

Estructura, ligereza y tecnología en el trabajo de R. Le Ricolais



Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Trabajo Fin de Grado

Autor:
Ignacio López Aniorte

Tutor/es:
Antonio Maciá Mateu

Julio 2019



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Agradecimientos a mi familia, compañeros, profesores y cada una de las personas que han ayudado a que estos cinco años de carrera hayan sido una de las mejores experiencias de mi vida.

Y todo está por empezar.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

01_ INTRODUCCIÓN - 11

02_ LA LIGEREZA EN LA HISTORIA DE LAS ESTRUCTURAS - 12

03_ ROBERT LE RICOLAIS - 22

03.1_ Biografía - 22

03.2_ Estudios - 23

03.3_ Metodología - 28

04_ TOPOLOGÍAS ESTRUCTURALES - 32

04.1_ El arte de la estructura es dónde colocar los huecos - 32

04.2_ Más es menos - 37

04.3_ Una cuerda rígida y hueca - 41

04.4_ El orden de la destrucción sigue al orden de la construcción - 44

04.5_ Espejismo en la imagen - 47

04.6_ Estructuras ligeras con elementos pesados - 51

04.7_ Columnas suspendidas en el aire - 54

04.8_ Conclusiones - 57

05_ INFLUENCIAS - 58

05.1_ Estructuras espaciales - 58

05.2_ Aplicaciones innovadoras - 71

05.2.1_ Puente - 71

05.2.2_ Muebles - 73

05.2.3_ Férulas - 74

06_ PROPUESTA SISTEMA TETRAGRID - 77

06.1_ Introducción - 77

06.2_ Evolución - 77

06.2.1_ Topología estructural - 78

06.2.2_ Tipología estructural -	80
06.2.3_ Puesta en obra -	82
06.3_ Propuesta Vivienda unifamiliar -	86
06.3.1_ Maqueta -	87
06.3.2_ Diagramas explicativos -	88
06.3.3_ Combinaciones -	90
06.3.4_ Mobiliario -	95
06.3.5_ Envolvente -	100
06.4_ Cálculo estructural -	102
06.4.1_ CYPE -	102
06.4.2_ Diseño del nudo -	106
06.4.3_ Estudio de optimización estructural -	110
07_ CONCLUSIONES -	112
08_ BIBLIOGRAFÍA -	114
09_ ANEXOS –	125
09.1_ Fotos Maqueta 1 -	125
09.2_ Fotos Maqueta 2 -	128
09.3_ Fotos Maqueta 3 -	131

ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 1 – Sección Cuevas de Canelobre	12
Figura 2 – Tumbas	13
Figura 3 – Stonehenge	13
Figura 4 – Sección Pirámide de Gizeh	14
Figura 5 – Imagen de la Gran Galería	14
Figura 6 – Templo egipcio	15
Figura 7 – Templo griego	15
Figura 8 – Templo romano	16
Figura 9 – Sección iglesia románica	16
Figura 10 – Sección iglesia gótica	16
Figura 11 – Galileo Galilei	17
Figura 12 – Dibujos de los ensayos de Galileo	17
Figura 13 – Home Insurance Building, Chicago, 1885	18
Figura 14 – Esquema estructural 1	19
Figura 15 – Esquema estructural 2	20
Figura 16 – Esquema estructural 3	20
Figura 17 – Pier Luigi Nervi.....	21
Figura 18 – Ricolais en el laboratorio	21
Figura 19 – Robert Le Ricolais.....	22
Figura 20 – Dibujo de un radiolario	24
Figura 21 – Bocetos de Ricolais	25
Figura 22 – Cuadro de Ricolais	26
Figura 23 – Estructura interna de los huesos	27
Figura 24 – Laboratorio de Ricolais	28
Figura 25 – Ricolais en el laboratorio con alumnos	30
Figura 26 – Pruebas de carga del Funicular Polygon of Revolution	33
Figura 27 – Maqueta del Funicular Polygon of Revolution	34
Figura 28 – Maqueta del Funicular Polygon of Revolution	34
Figura 29 – Maqueta del Funicular Polygon of Revolution	35
Figura 30 - Bocetos	35
Figura 31 - Bocetos	36
Figura 32 – Maqueta red Trihex	37
Figura 33 – Maqueta red Trihex	38
Figura 34 – Cálculos red Trihex	39
Figura 35 – Simulación Torre Alta Tensión	40
Figura 36 - Bocetos	40
Figura 37 – Maqueta Tube.....	41
Figura 38 – Maqueta Tension Net Structure	42
Figura 39 – Maqueta Tube.....	42
Figura 40 - Bocetos	42
Figura 41 - Bocetos	43
Figura 42 - Bocetos	43
Figura 43 – Maquetas del Isoflex	44
Figura 44 - Bocetos	45
Figura 45 – Maqueta del sistema Octen	46

Figura 46 – Maquetas de Pretension Transmission	46
Figura 47 - Burbujas	47
Figura 48 - Estudios.....	48
Figura 49 – Maqueta del Monkey Saddle.....	48
Figura 50 - Bocetos	49
Figura 51 – Maqueta del Octaedro	50
Figura 52 – Maqueta del Monkey Saddle.....	50
Figura 53 – Maqueta del Sistema Tetragrid	51
Figura 54 – Maqueta del Sistema Tetragrid	52
Figura 55 – Maqueta del Sistema Tetragrid	52
Figura 56 – Maqueta del Sistema Tetragrid	52
Figura 57 – Boceto Nudo Aplex.....	53
Figura 58 – Postes King y Queen	54
Figura 59 – Maqueta del sistema Polygen.....	55
Figura 60 – Sistema Polygen triplicado.....	55
Figura 61 – Bocetos del sistema Polygen como puente	56
Figura 62 – Maqueta del sistema Polygen como cubierta	56
Figura 63 – Kahn y Ricolais	58
Figura 64 – City Tower	59
Figura 65 - Fuller.....	60
Figura 66 – Dymaxion House.....	60
Figura 67 - Nervi	61
Figura 68 – Hangar militar	61
Figura 69 - Tange	62
Figura 70 – Pabellón de Japón, EXPO Osaka 1970	62
Figura 71 - Wachsmann.....	63
Figura 72 – USAF Aircraft Hangar	63
Figura 73 – Diseño nudo	63
Figura 74 - Otto	64
Figura 75 – Deutscher Pavillon	64
Figura 76 – Piano y Rogers	65
Figura 77 – Georges Pompidou Centre	65
Figura 78 – Foster.....	66
Figura 79 – British Museum.....	66
Figura 80 – Future Systems	67
Figura 81 – Coexistence Tower.....	67
Figura 82 – Simon Parsons.....	68
Figura 83 – Estructura del Watercube	68
Figura 84 – COX logo	69
Figura 85 – Helix Bridge.....	69
Figura 86 – Toyo Ito.....	70
Figura 87 – Mediateca de Sendai	70
Figura 88 - Puente	72
Figura 89 – Diagramas estructurales	72
Figura 90 – Nudo 3D mueble	73
Figura 91 – Nudo 3D mueble	73
Figura 92 – Soporte 3D mesa	74

Figura 93 – Férula brazo.....	75
Figura 94 – Férula mano.....	75
Figura 95 – Férula brazo.....	76
Figura 96 – Reflejo nudo.....	77
Figura 97 - Maqueta	78
Figura 98 – Sistema en reposo.....	79
Figura 99 – Sistema en tracción	79
Figura 100 – Maqueta sistema Tetragrid – Cubierta plana	80
Figura 101 – Maqueta sistema Tetragrid – Cubierta curva a dos aguas.....	81
Figura 102 – Maqueta sistema Tetragrid.....	81
Figura 103 - Maqueta sistema Tetragrid.....	81
Figura 104 - Maqueta sistema Tetragrid.....	82
Figura 105 – Dibujo del nudo.....	82
Figura 106 – Prototipo del nudo	83
Figura 107 – Dossier informativo del Hangar Apex	83
Figura 108 – Imagen del mercado de Camerún en construcción	84
Figura 109 – Alzado Maqueta 2	84
Figura 110 – Cubierta Maqueta 2	85
Figura 111 – Esquema de la parcela a edificar.....	86
Figura 112 – Elementos que componen la maqueta.....	87
Figura 113 – Alzado Maqueta 3	88
Figura 114 – Cubierta Maqueta 3	88
Figura 115 – Diagramas vivienda unifamiliar.....	89
Figura 116 – Planta Combinación 1	90
Figura 117 – Planta Combinación 2	91
Figura 118 – Planta Combinación 3	91
Figura 119 – Planta Combinación 4	92
Figura 120 – Planta Combinación 5	92
Figura 121 – Planta Combinación 6	93
Figura 122 – Planta Combinación 7	94
Figura 123 – Planta combinación 8.....	94
Figura 124 – Planta Combinación 9	95
Figura 125 – Mobiliario vivienda.....	96
Figura 126 – Mobiliario cocina	96
Figura 127 – Mobiliario entrada.....	97
Figura 128 – Mobiliario baño.....	97
Figura 129 – Mobiliario habitación individual/despacho.....	98
Figura 130 – Mobiliario habitación doble	98
Figura 131 – Mobiliario salón	99
Figura 132 – Vistas generales.....	100
Figura 133 – Fachada longitudinal	101
Figura 134 – Fachada transversal	101
Figura 135 - Cubierta.....	101
Figura 136 – Vista 3D de la estructura en CYPE3D	102
Figura 137 – Tabla de tipos de barras	102
Figura 138 – Tabla de Nudos en cubierta.....	103
Figura 139 – Área de acción de Nudos A.....	103

Figura 140 - Área de acción de Nudos B.....	103
Figura 141 - Área de acción de Nudos C.....	104
Figura 142 – Tabla de Nudos en alzado longitudinal.....	104
Figura 143 - Área de acción de Nudos D	104
Figura 144 - Área de acción de Nudos E.....	104
Figura 145 – Tabla de Nudos en alzado transversal.....	105
Figura 146 - Área de acción de Nudos F	105
Figura 147 - Área de acción de Nudos G	105
Figura 148 - Área de acción de Nudos H	105
Figura 149 – Tabla de secciones finales de la estructura por barras	106
Figura 150 – Boceto del nudo de Ricolais.....	106
Figura 151 – Pérgola en el Albir de SIDO Maderas.....	107
Figura 152 – Tabla de las secciones finales de las barras	107
Figura 153 – Planta del nudo propuesto	108
Figura 154 – Alzado del nudo propuesto.....	108
Figura 155 – Planta del nudo con las barras	109
Figura 156 – Vista axonométrica del nudo con las barras.....	109
Figura 157 – Ejemplo 1 Grasshopper	110
Figura 158 – Ejemplo 2 Grasshopper	110
Figura 159 – Ejemplo 3 Grasshopper	111

01_ INTRODUCCIÓN

“Peso cero y luz infinita” Robert le Ricolais

Con esta frase se puede comprender a la perfección todo el trabajo de estudio en el mundo de las estructuras que realizó el ingeniero francés Robert Le Ricolais. Un trabajo en el que la meta era conseguir la estructura más ligera posible cubriendo la mayor área posible, una meta inalcanzable pero que le llevó a entender las estructuras de una forma revolucionaria, llegando a mejorarlas y hacer posible la existencia de algunos de los sistemas estructurales que utilizamos en la actualidad.

La finalidad de este Trabajo de Fin de Grado es conocer a fondo a Ricolais, por un lado, conocer cómo trabajaba, entender su metodología, analizar los descubrimientos más importantes que tuvo y cómo llegó hasta ellos. Por otro lado, averiguar qué aportación han tenido sus estudios a la arquitectura de finales del siglo XX hasta la actualidad, su influencia sobre los arquitectos e ingenieros que le siguieron y sobre otras disciplinas fuera de la arquitectura y la ingeniería, ya que los estudios de Ricolais se basaban en multitud de conceptos, como son la naturaleza o la pintura.

Por último, mi propuesta personal se basa en averiguar cómo las nuevas tecnologías se pueden complementar con los estudios de Ricolais para conseguir una arquitectura optimizada, económica, flexible y fácil de construir que se adapte a las necesidades de la sociedad actual. Una sociedad en continuo cambio y crecimiento que necesita una arquitectura que se adapte y crezca a la misma velocidad y con la misma facilidad.

Como podemos observar con la citación del principio, la ligereza es algo que le obsesionó durante toda su carrera y no concebía las estructuras con la búsqueda de la ligereza, la optimización del material y la economía.

Pero para entender el trabajo de Ricolais y cómo su influencia ha llegado hasta nuestros días, primero tenemos que hacer un recorrido por la historia de las estructuras, unas estructuras en las que siempre se ha ido reduciendo el peso y la presencia de la misma y se ha ido dando más importancia y presencia al espacio, al lugar que habitamos. Esta evolución de las estructuras, muchas veces, era posible gracias a la referencia que tenemos hacia la propia naturaleza. En la naturaleza podemos encontrar sistemas estructurales óptimos que han llegado a la máxima ligereza posible, como pueden ser las telas de araña, los tallos de las flores o los huesos de los animales o humanos. El estudio de esos sistemas que encontramos en la naturaleza han dado paso a la evolución de las estructuras hasta llegar a la actualidad.

02_ LA LIGEREZA EN LA HISTORIA DE LAS ESTRUCTURAS

La ligereza ha sido siempre un aspecto muy importante en las estructuras, ya que la búsqueda de ésta ha hecho que las estructuras fueran evolucionando hasta las que conocemos hoy en día. Una ligereza que ha ido siempre ligada a la observación de la naturaleza, puesto que en ella es dónde encontramos las estructuras más óptimas y ligeras, ya sean en los vegetales o en el propio terreno.

Es allí, en el interior del terreno, donde podemos colocar el inicio de las estructuras, en las cuevas. Cuevas que se creaban de forma natural y en las que la relación entre la masa y el espacio era la adecuada para que se produjese ese espacio interior bajo toneladas de piedras. Dichas cuevas naturales sirvieron de referencia para la construcción de cuevas construidas por el hombre, pero también sirvieron para dar a los humanos la necesidad de un espacio cubierto que diera cobijo.



Figura 1 – Sección Cuevas de Canelobre

Este cobijo interior fue evolucionando hacia el cobijo en el exterior. Una evolución que ya se estaba dando con lugares sagrados o funerarios como eran las tumbas. Unas tumbas que se construían con piedras y se adaptaban a la topografía del terreno.



Figura 2 – Tumbas

Estas tumbas sirvieron de referencia para una de las primeras estructuras auto-estables apoyadas en el terreno, como son los dolmens. Un conjunto de 3 piedras formando una puerta o arco de paso que como sabemos, marcaban un lugar sagrado o funerario, como sucedió en Inglaterra con Stonehenge.



Figura 3 – Stonehenge

Podemos decir que en las primeras obras la estructura cobraba toda la importancia, ya que carecían de decoración alguna. La función era clara, marcar el paso hacia un lugar sagrado, pocas de ellas tenían la finalidad de hogar o refugio, pero esto fue cambiando conforme la gente necesitaba desplazarse.

Una civilización que aportó muchos cambios y evolucionó las estructuras fue la egipcia. Una civilización que desarrolló otra interpretación de cuevas artificiales con fin funerario, las pirámides. Unas pirámides cuya construcción se basaba en la desviación de las cargas para conseguir esos espacios interiores que contaban con toneladas de piedras sobre ellos, eran

como un hueco en el interior de una montaña. Una construcción muy avanzada y resistente para la época, ya que muchas de ellas siguen de pie en la actualidad.

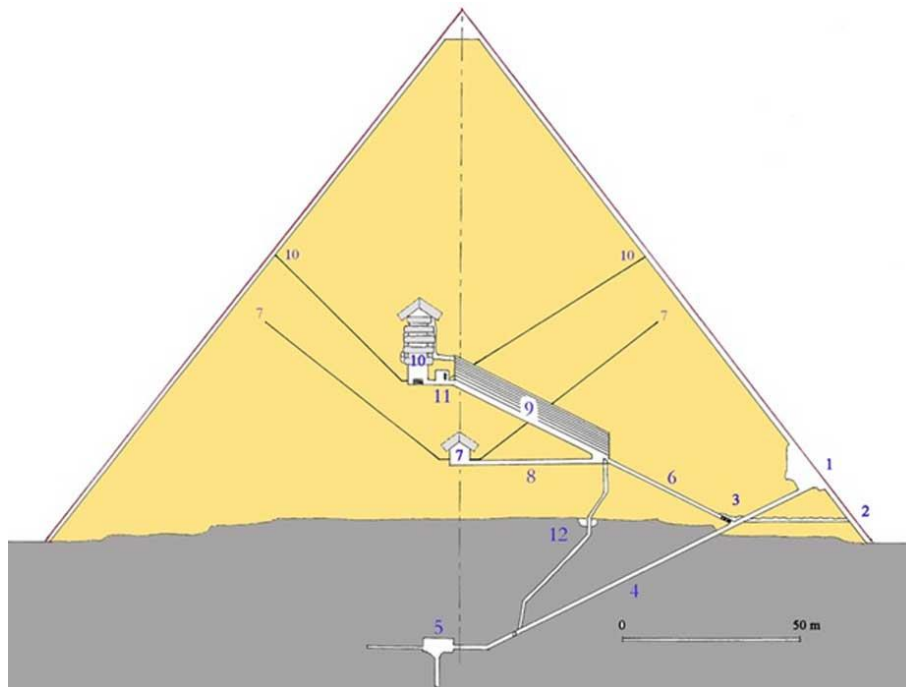


Figura 4 – Sección Pirámide de Gizeh

Una de las pirámides más importantes es la de Gizeh del Faraón Keops, en su Gran Galería encontramos un aspecto muy peculiar, sus paredes no son paralelas, sino que se van estrechando mientras van ascendiendo. Esta particularidad es debido a la desviación de las cargas que le llegan de las piedras que hay sobre ellas, lo que ellos no sabían eran que habían construido la primera bóveda, ya que el funcionamiento es muy similar.

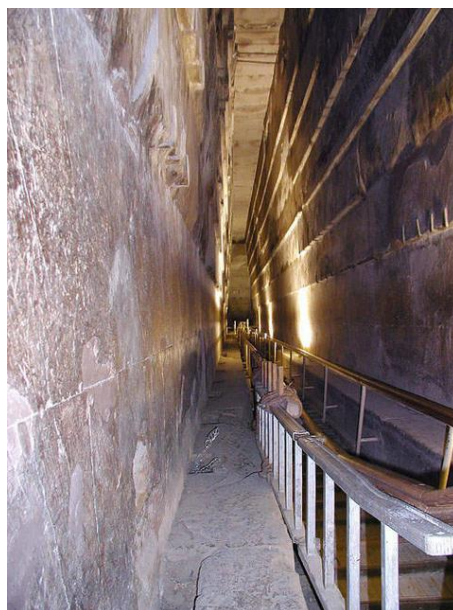


Figura 5 – Imagen de la Gran Galería

Pero los egipcios no solo construían pirámides, sino que también diseñaron espacios limitados por pilares en los exteriores de los templos. Zonas de paso y tranquilidad en las

que la estructura conformaba el espacio y marcaba los recorridos. Unos pilares de grandes dimensiones que se encontraban muy cerca unos de otros debido a las técnicas de la época. Estos espacios limitados por pilares han llegado hasta nuestros días. Los griegos y romanos también utilizaban pilares de grandes dimensiones para sus templos, poco a poco estos pilares fueron reduciendo su sección hasta llegar a los pilares que conocemos en la actualidad, cuya variedad de secciones y de materiales es muy variada gracias a las tecnologías que se han ido desarrollando.

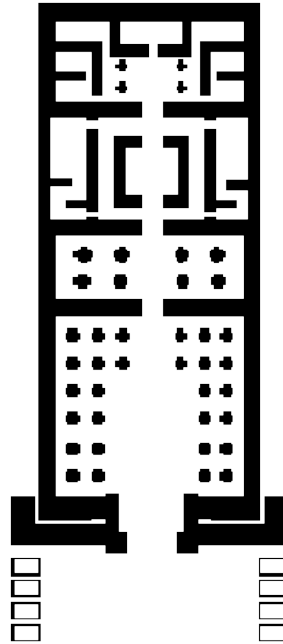


Figura 6 – Templo egipcio

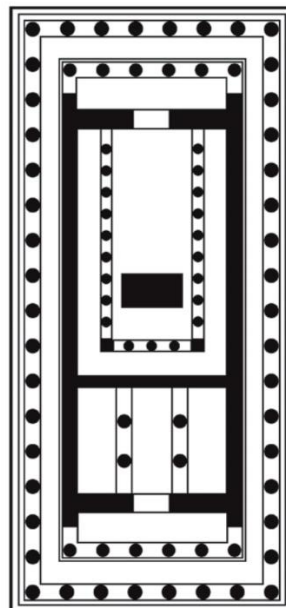


Figura 7 – Templo griego

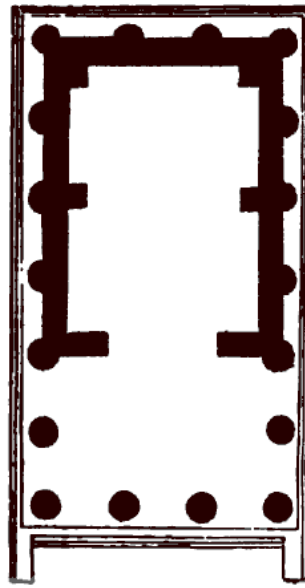


Figura 8 – Templo romano

La muerte y los Dioses eran los principales motivos por los que se construía en la **ANTIGÜEDAD** y en los edificios destinados a la veneración tanto de Dioses como de difuntos eran donde encontrábamos las tecnologías más innovadoras de la época. En la **EDAD MEDIA** cambió dicha percepción y la Iglesia era la que albergaba el mayor poder económico y quería que dicho poder se viera reflejado en sus edificios, es decir, en las iglesias y catedrales.

Unas iglesias que fueron evolucionando según las tecnologías, las técnicas y la propia sociedad. Conforme iban mejorando las técnicas, las iglesias iban reduciendo su estructura, dándole más valor a otros aspectos como la luz. También había un cambio de materialidad con el incremento de tecnologías y la piedra iba dejando paso a nuevos materiales como era el vidrio y el metal.

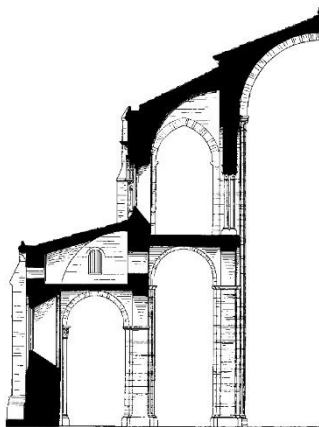


Figura 9 – Sección iglesia románica

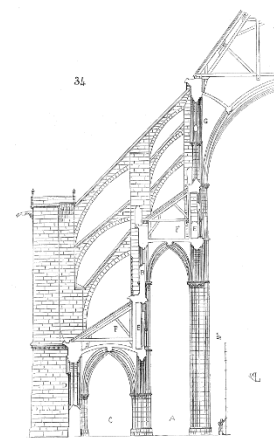


Figura 10 – Sección iglesia gótica

En estas dos secciones podemos comprobar las diferencias más importantes entre el románico y el gótico, unos cambios que hicieron que las iglesias fueran mucho más altas, más esbeltas y ello permitiera también una mayor entrada de luz. Como podemos observar en la sección gótica, se empiezan a introducir unos elementos más finos llamados arbotantes que marcan el lugar por dónde se van a transmitir las cargas desde la cubierta a la cimentación. Se coloca masa únicamente por donde va a pasar la carga, un aspecto que Ricolais tendrá muy en cuenta y lo intentará llevar al extremo.

Todas las construcciones que hemos visto hasta el momento se hacían por prueba y error y gracias a los conocimientos que se heredaban de generación en generación. Pero hubo un año y una persona que marcaron la historia de las estructuras, Galileo Galilei en el año 1638.

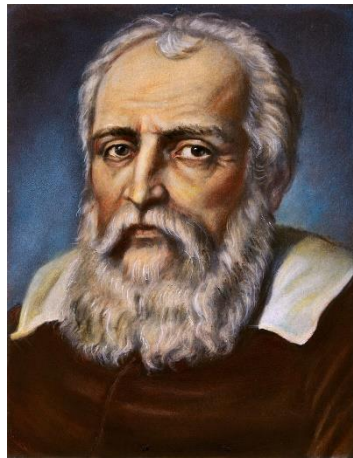


Figura 11 – Galileo Galilei

Galileo fue la primera persona que intentó predecir lo que iba a suceder en una estructura antes de llegar a construirla, es decir, fue la primera persona que se planteó el cálculo estructural. Sus ensayos se basaban en la experimentación por medio de ensayos y en la observación de los mismos, sus conclusiones no fueron exactas, pero fueron un buen punto de partida para futuros matemáticos. Entre sus ensayos encontramos de tracción, de viga en ménsula, para explicar la ley de la palanca...

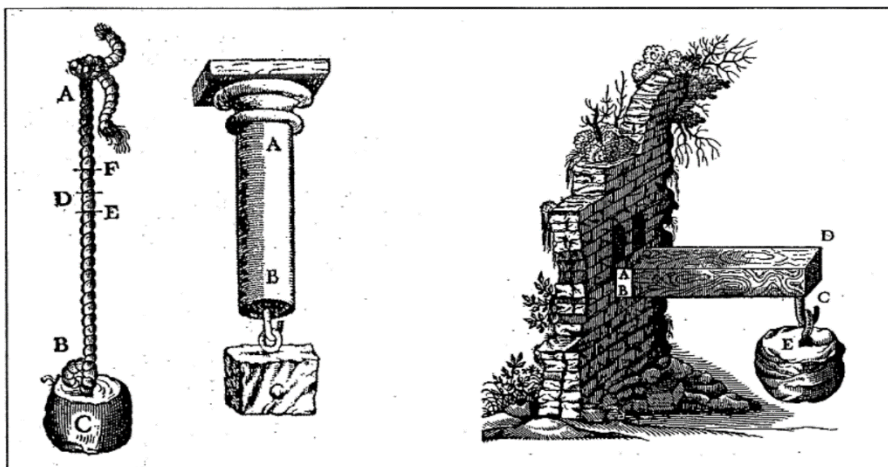


Figura 12 – Dibujos de los ensayos de Galileo

A partir de los estudios de Galileo, muchos matemáticos se dieron cuenta de la importancia que podía llegar a tener el cálculo estructural, puesto que las primeras industrias estaban evolucionando y pronto llegaría la Revolución Industrial. Hubo una gran cantidad de matemáticos que fueron desarrollando las primeras aproximaciones de Galileo durante muchos años, tres de ellos desatacaron sobre el resto haciendo que sus fórmulas lleguen a ser utilizadas en la actualidad por todos los arquitectos e ingenieros y se hayan utilizado a la hora de programar los programas informáticos que calculan estructuras en la actualidad. Entre ellos destacan nombres como Navier, Euler y Hook cuyas fórmulas se siguen enseñando en las escuelas de arquitectura e ingeniería para el conocimiento básico de las estructuras.

Pero no fue hasta finales del **SIGLO XIX** que empezaron a poner en práctica dichas fórmulas en el cálculo estructural de edificios. La escuela que más destacó en el cálculo estructural fue la de Chicago siendo la pionera en la construcción en altura. Antes habíamos mencionado que era la Iglesia la que contaba con el poder en la Edad Media, ahora en la Revolución Industrial eso había cambiado completamente y eran las empresas las que contaban con el poder, esto se veía reflejado en la arquitectura, ya que éstas querían demostrar su poder a partir de sus edificios e instalaciones. Este hecho hizo que se quisieran construir edificios cada vez más altos y se empezara una nueva era, la era de los edificios en altura.



Figura 13 – Home Insurance Building, Chicago, 1885

El primero de los rascacielos fue el Home Insurance Building, diseñado por William Le Baron Jenney, padre de la Escuela de Chicago. A partir de él llegaron muchos más, unos

edificios en altura que requerían de un cálculo previo, ya que no podía haber error a la hora de construir, un cálculo a mano no muy avanzado, pero que ya les permitía saber si lo que estaban diseñando era viable, pero, sobre todo, les permitía ajustar los perfiles a lo que era necesario. Esto permitió una reducción en la sección de las estructuras, es decir, una reducción de peso y de coste económico que fue muy importante.

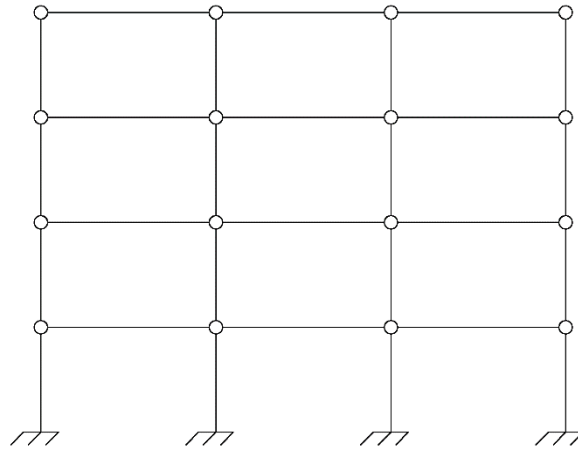


Figura 14 – Esquema estructural 1

La primera aproximación de edificios en altura fue de pórticos de pilares y vigas apoyadas, es decir, articuladas en ambos extremos, ya que este tipo de estructuras eran las únicas que se podrían calcular por medio de las fórmulas al ser isostáticas. El gran problema venía en la resistencia ante fuerzas laterales como el viento, ya que estas estructuras eran incapaces de soportarlas. Para ello, se revestían con piedra para solventar el problema del viento, creando edificios de estructura metálica con fachada de piedra. Con esta solución no se podían construir edificios de una mayor altura debido al empuje del viento, por tanto, se necesitaba encontrar otra solución que se pudiera calcular previamente con las fórmulas existentes pero que contase con nudos rígidos que resistieran a los empujes laterales.

Esta solución la dio Viollet le Duc gracias a un sistema estructural de pórtico en los que los nudos eran rígidos, pero se articulaban los puntos medios de cada barra, creando una estructura isostática que era posible calcular. Esa articulación del punto medio de cada barra era debida a que era aproximadamente el punto de inflexión de la deformada y gracias a ella se pudo aumentar la altura de los edificios.

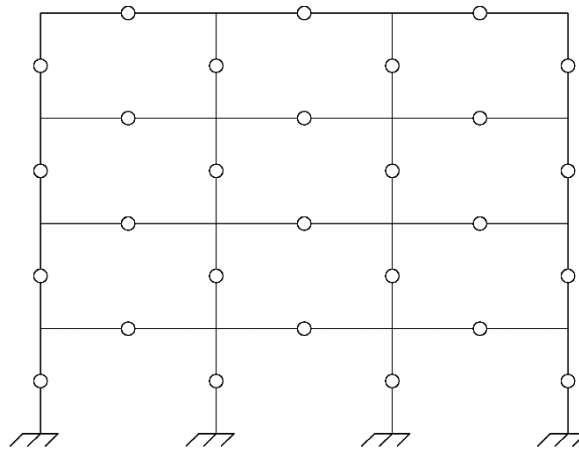


Figura 15 – Esquema estructural 2

Una tercera aproximación fue la de Cross, que siguiendo su propio método ya se podía calcular los pórticos totalmente rígidos, lo que permitió aumentar aún más la altura de los rascacielos.

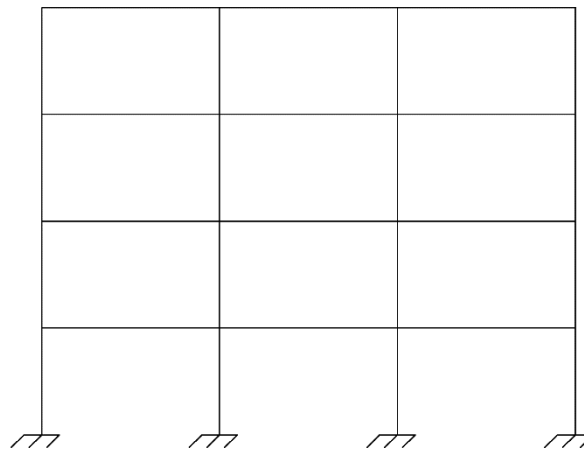


Figura 16 – Esquema estructural 3

Después de conseguir calcular los pórticos totalmente rígidos, ya no se podía avanzar más en ese sistema puesto que la única solución era aumentar la sección de la estructura, lo que hacía que el peso y el coste aumentara, llegando a hacer que no fueran viables tanto por el aspecto económico como por el aspecto técnico, no se podían construir. Era necesario seguir evolucionando las estructuras para conseguir unas estructuras más altas y más ligeras. A mediados del siglo XX aparecieron dos ingenieros que dieron con la solución, las estructuras espaciales.

Estos dos ingenieros dejaron de entender las estructuras en dos dimensiones y le aportaron una tercera dimensión que permitía cubrir un mayor espacio con un menor peso. Ellos fueron el italiano Pier Luigi Nervi y el francés Robert Le Ricolais.

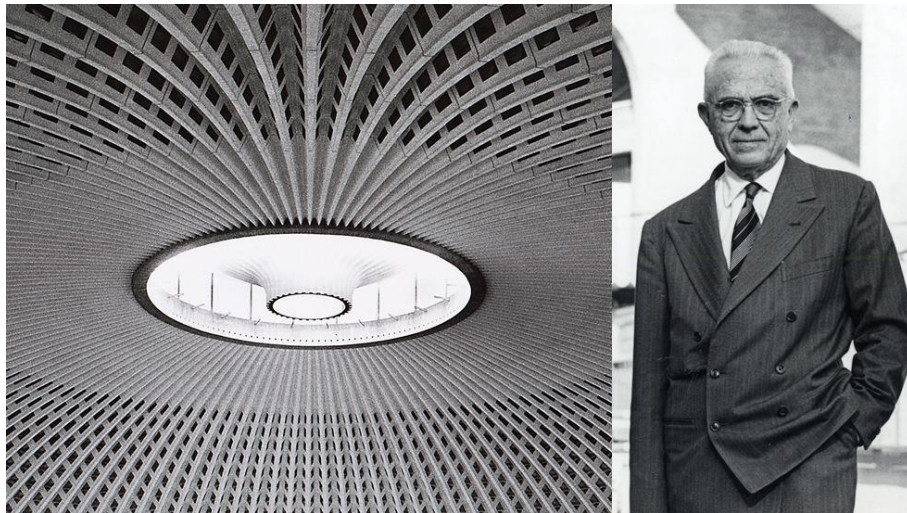


Figura 17 – Pier Luigi Nervi



Figura 18 – Ricolais en el laboratorio

Vamos a centrarnos en el estudio de los sistemas estructurales tridimensionales que tuvo el francés Ricolais, un estudio gracias a maquetas estructurales experimentales que le permitían predecir lo que le iba a suceder a la estructura de forma física y hacer las pruebas suficientes para reducir su peso.

03_ ROBERT LE RICOLAIS

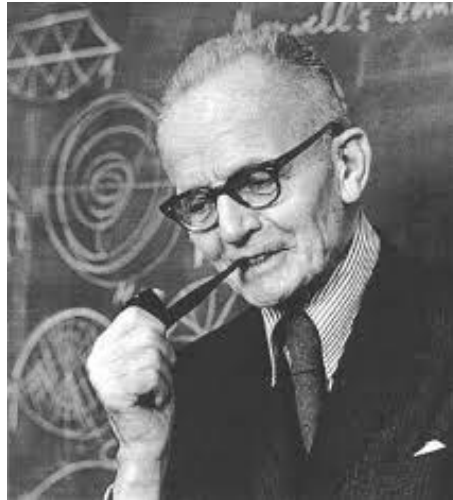


Figura 19 – Robert Le Ricolais

Para conocer el trabajo y la forma de trabajar de Robert Le Ricolais, primero hay que conocer un poco de su vida y los lugares por los cual pasó, que fueron determinantes en el proceso de sus investigaciones y descubrimientos.

Inventor de formas, estructuras y nuevos cálculos estáticos, Robert Le Ricolais no era ni arquitecto, ni ingeniero ni matemático, pero lo era todo a la misma vez, destacó por estudiar “*la estructura de las estructuras*”. A pesar de no tener título académico definido, dejó una gran influencia en el mundo de la estructura y llegó a ser un gran investigador y profesor de arquitectura. Él mismo se sitúa fuera de la teoría y práctica ortodoxas de los ingenieros y arquitectos. El académico Laprade lo denomina el “*Claude Bernard de la arquitectura*” por haber conseguido introducir en esta disciplina el método experimental que tanto usaba y defendía.

03.1_ Biografía

Ricolais nació en La Roche-sur-Yon (ubicarlo) en el año 1894. Prepara una licenciatura en ciencias, pero se ve obligado a detener sus estudios por culpa de la guerra y nunca los llegará a recuperar. Vuelve de la guerra gravemente herido y con una pensión de invalidez, una pensión que fue la que le permitió vivir el resto de su vida, a pesar de haber tenido una vida muy laboriosa, pero sin llegar a tener trabajo como arquitecto o ingeniero.

De 1918 a 1931 vivió en París, donde pudo asistir a la academia de La Grande-Chaumière y Montparnasse. Allí se convierte en un pintor constructivista del linaje de Tatlin, lo que hace que cada vez se sienta más atraído por la construcción. Su conocimiento científico, particularmente en química, cristalografía y zoología, hizo que se inspirara en soluciones análogas originales en estas áreas. Conchas, radiolarios o cristales son ejemplos de velas,

redes y marcos que intenta traducir en proyectos que emprende en colaboración con jóvenes arquitectos innovadores.

En el año 1931 se traslada de París a Nantes, lugar en el que podrá dedicarse durante trece años a su nueva pasión, las estructuras. Es aquí donde se abre un período muy fructífero de su carrera durante el cual desarrolla sistemas, crea patentes y publica artículos. Sistemas relacionados con el ejército y las estructuras tridimensionales.

Tal fue la importancia de sus descubrimientos que le permitieron trasladarse a Estados Unidos para dedicarse a la docencia durante los próximos 20 años. Desde el año 1954 al 1974 permaneció en la Universidad de Pensilvania como docente e investigador, liderando un taller de estructuras experimentales. Allí en Pensilvania estableció una estrecha relación con Louis Kahn, con quién compartía la clase de proyectos del Master de Arquitectura. Dicha relación desembocó en una mutua influencia que se confirmará en la práctica en la colaboración continua en proyectos y obras completas. Además de la forma de entender la arquitectura y, sobre todo, en la forma de entender la estructura como parte organizadora del espacio y de la propia arquitectura. A parte de en Pensilvania, dirigió talleres por diferentes universidades de Estados Unidos como Illinois-Urbana, Carolina del Norte, Harvard y Michigan.

En Francia se le consideraba “*el padre de las estructuras espaciales*” y apostaba por la experimentación y la curiosidad. Él mismo afirmaba que “*el secreto es tener curiosidad*”. A pesar de no contar con una titulación específica, su trabajo fue premiado en numerosas ocasiones por instituciones muy importantes como el American Institute of Architects del cual fue miembro a partir del 1973 y en 1976 se le otorgó la Medalla A.I.A. de Investigación, o el IRASS (Instituto de Investigación y Aplicaciones de Estructuras Espaciales) en el año 1977, dicho instituto pasó a llamarse “Instituto Le Ricolais” debido a los grandes descubrimientos que realizó Ricolais para el mundo de las estructuras espaciales.

Falleció en el año 1977 en París a los 83 años de edad y tras una vida completamente dedicada a la investigación y la docencia.

03.2_ Estudios

Después de haber conocido la vida de este gran investigador, vamos a adentrarnos en su forma de trabajar y de entender el mundo de las estructuras, una forma innovadora que le hizo estar un paso por delante de sus coetáneos.

Una vida por la cual pasó por determinadas disciplinas que lo fueron formando, pero nunca acotando y limitando, ya que él utilizaba sus conocimientos de todas esas disciplinas para seguir investigando y descubriendo. Dichas disciplinas son la ciencia, la pintura, la ingeniería y la arquitectura. Este dominio de numerosas disciplinas hace que pueda llegar a formar arquitectura sin pensar directamente en la arquitectura, sino que lo hace fijándose en conceptos que otros arquitectos no hacían, como son la naturaleza, las matemáticas, la pintura, la estética o la investigación.

A continuación, vamos a comprobar como cada uno de estos conceptos son importantes para entender el trabajo de Ricolais:

- Naturaleza

Debido a sus conocimientos en ciencia, se siente admirado por la naturaleza y afirma que la arquitectura es la mejor disciplina que ha encontrado a la hora de observar y entender los prodigios creados por la naturaleza. Unos prodigios, a los que también denomina “*pequeñas cosas maravillosas*”, cuya belleza y rigor supone un incentivo sorprendente y los cuales contienen mucha más inteligencia que las obras de un arquitecto o un ingeniero.

Algunas estructuras de la naturaleza nos revelan modelos, unos modelos de los cuales nos podemos inspirar sabiendo las limitaciones técnicas existentes debidas al material o las tecnologías que utilizamos, no imitarla directamente esperando que funcione igual de bien que lo hace en la realidad. El mismo Ricolais se dio cuenta pronto que la optimización de las estructuras que encontramos en la naturaleza no se pueden llegar a obtener, ya que es perfecta, por este motivo formuló la siguiente frase: “*Tienen que obedecer, pero no imitar a la naturaleza*”.

Tan pronto como excedemos ciertos límites, surgen otros tipos de problemas que no habíamos tenido en cuenta antes. Las cosas y sus proporciones es una ley de la naturaleza que debemos seguir antes de dominarla. Los cambios de escala era algo de Ricolais siempre tenía en cuenta porque cambian completamente la forma de trabajar de una estructura.

Los radiolarios y sus formas geométricas, los minerales y la partición equitativa del espacio, la forma de las películas de jabón y los términos fuerza-peso de las telas de araña con diferentes ejemplos de la naturaleza que Ricolais analizará y de los cuales se inspirará para formar sistemas estructurales que funcionan de manera óptima.

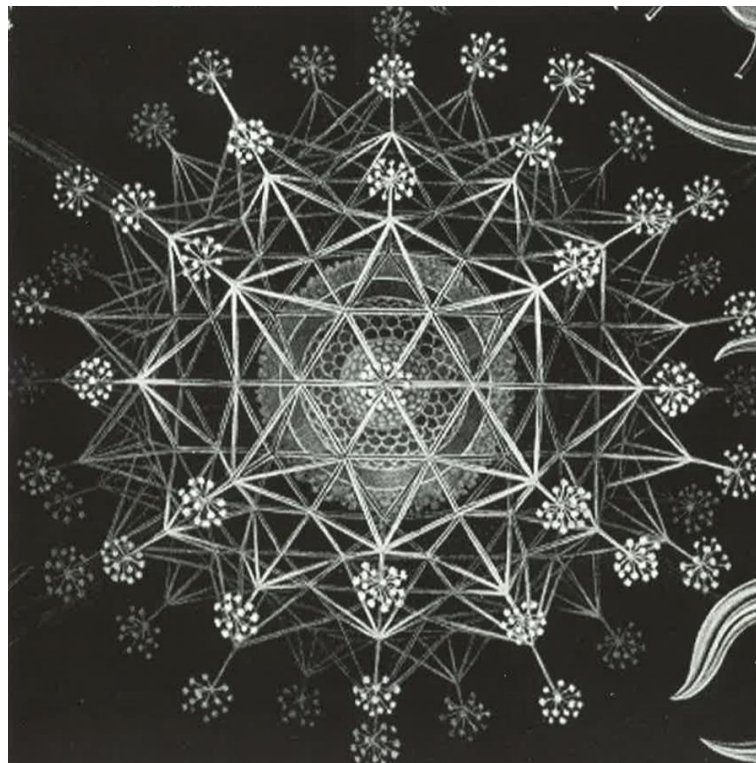


Figura 20 – Dibujo de un radiolario

- **Matemáticas**

Las matemáticas ocultan un gran número de formas inexploradas. Detrás de esa gran cantidad de símbolos y fórmulas, se esconden una gran cantidad de formas, algunas de las cuales Ricolais intentará descubrir.

La precisión de la matemática, la elegancia del simbolismo y el heroico trabajo de la simplificación son conceptos que Ricolais intentará adoptar para la experimentación de estructuras y para poder explicarlas, una vez funcionen o no.

Ese conocimiento matemático le permitió estudiar las estructuras de forma topológica. La topología es un nuevo pensamiento matemático donde las formas y las magnitudes de las configuraciones no importan. Ricolais experimentará con estructuras a partir de configuraciones con ausencia de escala que, a primera vista, no son nada, pero tienden hacia una configuración posible. A partir de conceptos matemáticos, junto con la experimentación podrá poner a prueba formas que la matemática esconde tras sus fórmulas.

Era muy común encontrar dibujos de Ricolais rodeados de fórmulas y números, ese trabajo conjunto del dibujo con la matemática hizo que consiguiera descubrimientos de nuevas formas desconocidas en el mundo de las estructuras.

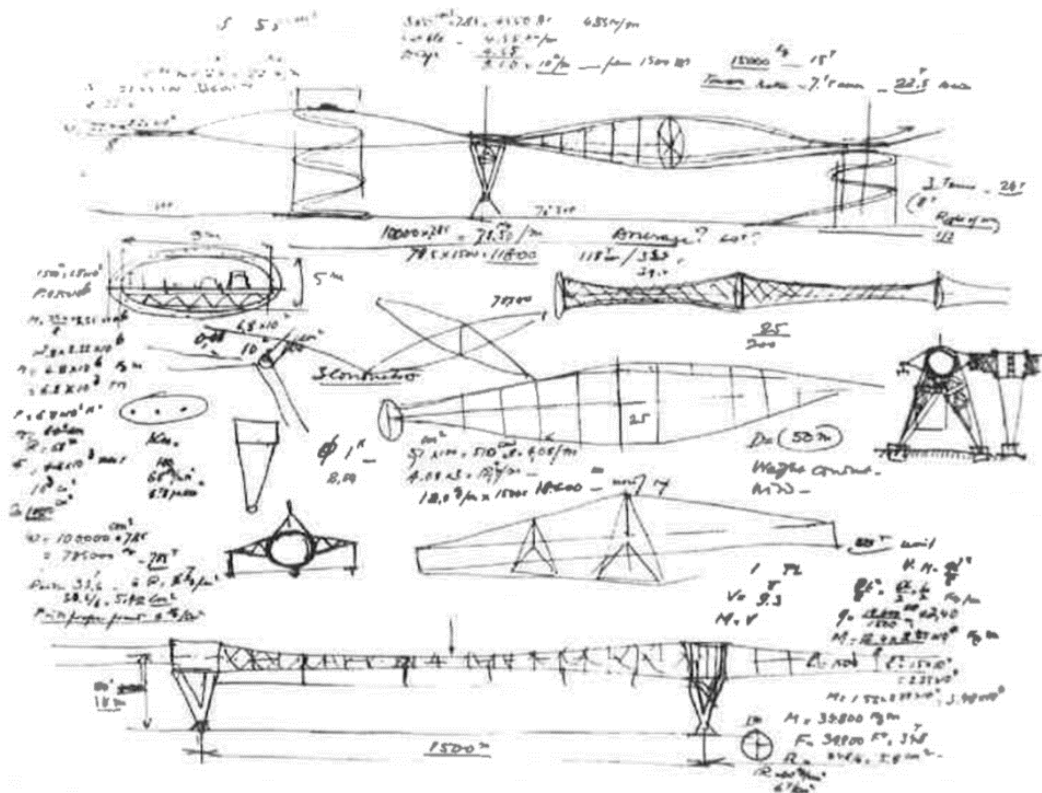


Figura 21 – Bocetos de Ricolais

- Pintura

El hecho de no tener una formación y de no confiar en la mano para realizar un dibujo de calidad, hizo que Ricolais llegara a una conclusión, que luego llevaría a la estructura: *“En algún momento llegamos a disfrutar de lo que carecemos”*. Ese momento nos lleva a la noción de compensación y de disfrute de una acción, a pesar de no ser expertos.

Por ello, años después empezó a realizar maquetas experimentales que carecían de detalle, simplemente sabía cómo quería que funcionara y se negaba a entrar en detalles y a graficar hasta que no supiera que estaba en lo cierto sobre el funcionamiento estructural. Maquetas en las que no temía el error y disfrutaba experimentando con ella, ya fueran maquetas muy sencillas o maquetas complejas.



Figura 22 – Cuadro de Ricolais

- Estética

La estética es algo muy subjetivo, Ricolais carecía del sentido del orden que hace que te sientas atraído por las cosas simétricas. Un pseudo-orden, como él mismo lo denominaba, porque ni en la naturaleza ni en el arte podemos encontrar esta repetición tan perfecta, una repetición total que llega a aburrir.

Ricolais apostaba por una estética inspirada por la naturaleza y gobernada por números, una estética en la que no hay un orden claro, pero todo tiene sentido, todo es necesario. Él apostaba por la funcionalidad antes que la estética, pero gracias a la utilización de fórmulas matemáticas, conseguía que esas estructuras sin un orden claro fueran atractivas al ojo humano.

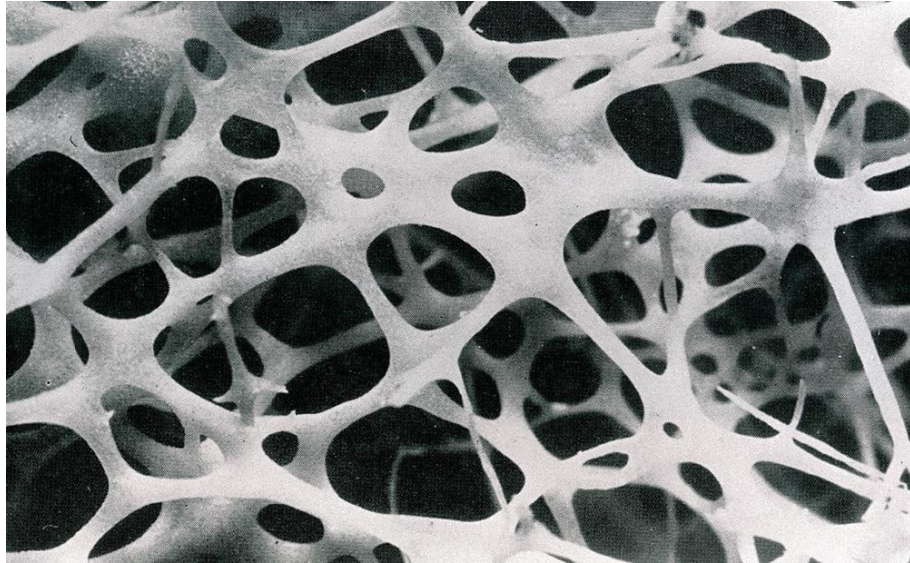


Figura 23 – Estructura interna de los huesos

- Investigación

Ricolais basó su vida en una misma investigación: “*peso cero, espacio infinito*”. Algo que se sabe que es imposible, pero él quería averiguar hasta dónde se podía llegar y contribuir a encontrar la mayor luz con el mínimo peso posible. Según él, el secreto es ser curioso, no hay que rendirse ante la imposibilidad de lograr la meta, ya que lo que encontramos en el camino es a menudo más fascinante que aquello por lo que nos pusimos en marcha. Se necesita una actitud no-antropomórfica de la mente hacia lo desconocido.

Las analogías fueron parte importante del trabajo de Ricolais, ya que entendía su estudio las estructuras como un sistema de ida y vuelta que va de lo concreto a lo abstracto. Era una cuestión de relación entre la realidad y los símbolos.

Ricolais sentía la necesidad de representar lo que tenía en mente, de experimentar mediante el contacto. Por ello, establece la experimentación mediante maquetas como su sistema principal de investigación y así lo muestra a sus alumnos en la Universidad de Pensilvania. Una representación que iba siempre acompañada de la observación y de la intuición.

Pero todo sistema experimental evoluciona gracias a la prueba-error. Esto conlleva una gran paciencia y constancia, dos características propias de los inventores y Ricolais se consideraba uno de ellos.

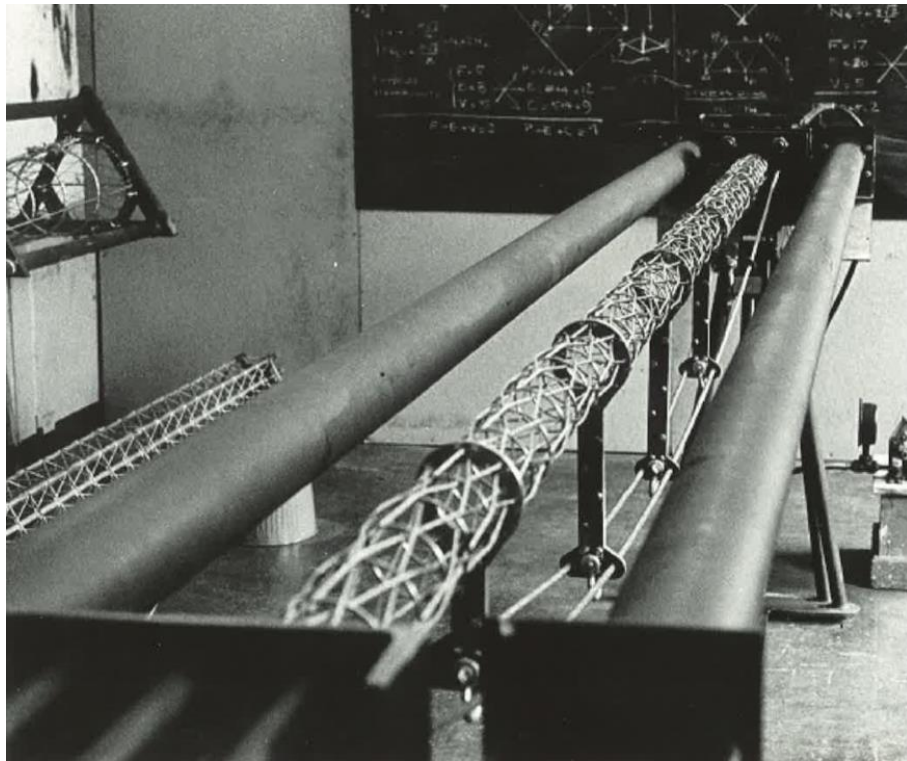


Figura 24 – Laboratorio de Ricolais

03.3_ Metodología

Ricolais basa su forma de trabajar en estos cinco conceptos, lo que le aleja de las prácticas habituales de los arquitectos y los ingenieros a mitad del siglo XX. Su trabajo, como hemos visto en el apartado de Investigación, se basaba en la búsqueda del “peso cero, luz infinita” gracias a un sistema estructural. En otras palabras, buscaba una idea indestructible con la cual alcanzar la mayor ligereza cubriendo la mayor área posible.

Para ello, se fijó en la naturaleza, la cual le servía de inspiración puesto que en ella se encontraban los sistemas estructurales que mejor funcionaban y mejor optimizados estaban. En dicha búsqueda por la ligereza máxima quería dar con un entramado, una estructura, o “todo” armónico, que permitiera una explicación alternativa de la naturaleza de las cosas que incluye la explicación de la naturaleza del espacio, y de sus relaciones respectivas, las relaciones entre materia, estructura y espacio. O lo que puede parecer lo mismo, una teoría del espacio y de la organización material dentro de él, como bien se narra en el artículo dedicado a Ricolais escrito por Helena Iglesias en la Revista Arquitectura nº 312 del año 1997.

Como todo inventor o “Cerebro experimental”, como también se le denomina en algunos textos, Ricolais tenía su proceso de trabajo que constaba de 4 pasos previos a la experimentación con las maquetas. Estos 4 pasos son:

1. Observación

Observación de prodigios creados por la naturaleza

2. Síntesis

Identificación de un modelo geométrico resultante de una determinada acción mecánica.

3. Análisis

Deducción de un principio mecánico general

4. Propuesta

Proposición de configuraciones estructurales alternativas y sus aplicaciones.

Estos pasos, en la actualidad, son pasos que los tenemos muy asimilados y estamos acostumbrados a ellos. Esto es posible gracias a profesionales como Ricolais, pero no todo quedaba en la propuesta. Su carrera destacó por probar y experimentar con esas propuestas finales que surgían del proceso de investigación. Unas propuestas que se experimentaban gracias a las maquetas.

Para Ricolais, las maquetas son muy importantes ya que tienen ese carácter experimental que tanto le atraía. Gracias a las maquetas podía comprobar si sus suposiciones eran acertadas y descubrir nuevos comportamientos estructurales de los materiales. Pero, como en la gran mayoría de las experimentaciones, encontramos muchos más fallos o errores que aciertos, pero este motivo no hacía que se viniera abajo, sino que lo anima a seguir.

Según se narra en el artículo dedicado a Ricolais escrito por Helena Iglesias en la Revista Arquitectura nº 312 del año 1997, él mismo veía ese fallo o error como la belleza del fracaso, se refiere a fracaso en el sentido de rotura o cesión del cometido resistente de los elementos estructurales, y desarrolla la idea de que la manera en que las estructuras “fracasan” ofrece estimulaciones muy estimulantes y útiles sobre cómo sería posible construir otras más eficaces, o que “fracasaran” menos, más tarde, con más carga o mejor. Pero resulta también, y a la vez, una frase poética, que implica entender cómo un “valor” el fracaso, en el sentido estricto, en su aceptación de oposición al éxito, por permitir, mediante el “arte de utilizar el fracaso” una especie de avance o de “huida hacia delante”.

Una forma peculiar de ver el fracaso, ya que Ricolais contaba con una mirada anti-tópica, profundamente reflexiva, cargada de ironía, muy divertida y muy sugerente, como destaca Helena Iglesias en su artículo. Otro aspecto a destacar sobre la forma de ser y trabajar es el hecho del gran uso que hace de las paradojas, intenta relacionar todos sus descubrimientos con diferentes paradojas que iremos viendo en cada uno de ellos.

Como hemos visto en su biografía, en el año 1954 se traslada de Nantes a Pensilvania para liderar un taller de estructuras experimentales, llegando a ser una de las primeras personas que apuestan por las maquetas como un experimento y no como una “simple” representación de una arquitectura o una estructura. Unas maquetas que se ponían a prueba para comprobar sus límites estructurales y simular cómo se podrían comportar en la realidad.

Una forma de trabajar, muy criticada por gran parte de los arquitectos e ingenieros de la época, ya que veían que no era fiable comprobar con maquetas el funcionamiento de las estructuras de grandes infraestructuras. Pero el tiempo le dio la razón a Ricolais, ya que sólo siendo curioso y haciendo pruebas se puede innovar y mejorar los sistemas estructurales existentes y esto es lo que él defendía y siguió haciendo durante 20 años en Pensilvania.

Ricolais tuvo la oportunidad de dedicarse a la docencia, a la vez que a la investigación y no entendía la una sin la otra. Para él, la investigación le servía para mejorar su docencia cada año y lo que experimentaba en clase con sus propios alumnos le servía para avanzar sus investigaciones y resolver, con la ayuda de sus alumnos, todas las dudas e inquietudes que tenía. Esta retroalimentación de la docencia y la investigación le permitió dejar un legado y formar a una nueva generación de arquitectos con una concepción totalmente distinta e innovadora sobre las estructuras. Una generación de arquitectos que no entendía la arquitectura sin la estructura.



Figura 25 – Ricolais en el laboratorio con alumnos

Pero previo a la experimentación, siempre había un estudio previo de observación, síntesis y análisis con el cual se proponían diferentes configuraciones estructurales posibles. Esas propuestas, muchas veces esas propuestas eran completamente distintas, pero rivalizaban entre sí porque eran equivalentes para alcanzar la misma funcionalidad. Lo que Ricolais conseguía con las maquetas era comprobar cuál de esas propuestas era la más óptima, es decir, cuál de ellas era la más ligera para las mismas solicitaciones.

Todas las propuestas contaban con una característica común, la relación entre formas, es decir, la conformidad de relaciones opuestas. Ricolais descompone la estructura en dos grupos que actúan masivamente, separa lo traccionado de lo comprimido, y hace que se equilibren por medio de la tensión. Gracias a esto, hacía que cada parte de la estructura

trabajara de la forma más adecuada, y así conseguía reducir el peso de las mismas o, dicho de otra forma, conseguía optimizar la estructura.

Dichas propuestas, formalizadas en maquetas, están diseñadas desde un punto de vista topológico, que caracterizaba a Ricolais, creando unas formas muy atractivas. A diferencia de otros arquitectos e ingenieros de su época, él no diseñaba tipologías estructurales definidas, sino que diseñaba unas estructuras in-acabadas que tienden hacia una configuración posible, no son nada exactamente, pero pueden llegar a ser algo. Unas estructuras que no contaban con escala, ya que Ricolais sólo quería comprobar que el sistema que había diseñado funcionaba correctamente. En esta búsqueda, en esta prueba error, era donde él más disfrutaba y aprendía, recordando la frase, que ya mencionaba cuando se refería a su época dedicada a la pintura, “disfrutar de lo que carecemos”.

Igual que carece de escala, también carece de detalles en los grafismos, ya que lo único que interesaba era comprobar la funcionalidad de estas estructuras tridimensionales atractivas, para encontrar posibles aplicaciones del mismo sistema. Una vez estuviera comprobado que el sistema funciona, ya llegaría el momento de definir detalles y materiales, según la escala y la ubicación de la obra. La escala y la ubicación eran factores muy importantes a la hora de escoger materiales, ya que en esa época los transportes de materiales eran mucho más costosos que en la actualidad y la elección podría hacer que un proyecto fuera o no viable, dependiendo siempre del factor económico.

Unas topologías que no eran nada, no eran ni un edificio, ni un puente, ni una cercha... Pero eran topologías que tendían a algo, se llegaban a asemejar a elementos arquitectónicos. Este paso de las topologías a una tipología estructural concreta y la capacidad de una topología de ser varias tipologías distintas era lo que diferenciaba la forma de pensar de Ricolais del resto de ingenieros y arquitectos de mediados del siglo XX.

A continuación, vamos a ver las topologías estructurales más importantes que Ricolais desarrolló durante su estancia en Pensilvania, los avances y cambios que estas sufrieron, los conocimientos que aportaron y las diferentes tipologías estructurales en las cuales se podían llegar a convertir. Unas topologías muy diversas que trataron temas muy distintos como sistemas de comunicación, edificios en altura o puentes.

04_ TOPOLOGÍAS

Como hemos visto anteriormente, Ricolais diseñaba desde un punto de vista topológico, un punto de vista desde el cual la escala y los detalles no eran importantes, sino que lo más importante era experimentar si el sistema funcionaba o no, y cómo podría mejorar.

Durante los 20 años que estuvo en Estados Unidos dedicándose a la docencia y la experimentación de estructuras espaciales, Ricolais llegó a desarrollar diferentes tipologías, algunas más exitosas que otras, pero todas seguían la misma meta, “peso cero, luz infinita”. Cada una de las topologías está relacionada a una paradoja y no se puede llegar a entender sin ella. Estas paradojas eran muy usadas por Ricolais para transmitir sus ideas y comunicarse, tanto en sus libros como en sus clases y charlas.

A continuación, traemos las 6 topologías más influyentes e importantes de su carrera, todas ellas con su paradoja, sus bocetos y los aspectos más importantes que Ricolais experimentaba en ellas.

04.1_ El arte de la estructura es dónde colocar los huecos

Una de las frases más conocidas de Ricolais, la cual surgió después de un análisis de la estructura interna de los huesos, dicho de otra forma, la estructura de la estructura. Basándose en la estructura de la masa ósea de Kullman de 1866, llegó a descubrir que en el interior de los huecos sólo existía masa en el lugar que era necesario, es decir, sólo existe masa en los lugares por donde pasan las cargas, las conocidas en la actualidad como líneas isostáticas. Dichas líneas son la unión de una sucesión de puntos con un mismo valor de tensión o tensión principal. Una tensión principal que viene dada por dos valores de tensiones, la normal y la tangencial, que varían en función del plano de corte, punto en el cual la tangencial es 0 y la normal es máxima. Las líneas o curvas isostáticas son el camino más óptimo para una fuerza que origina una tensión determinada. Por este motivo, Ricolais distribuía la materia de sus estructuras según las líneas isostáticas y defendía que debíamos diseñar con los huecos en vez de con los elementos sólidos y que sólo así podremos llegar a la verdad.

Parece que hay dos posibles actitudes opuestas en la búsqueda de estructuras: comenzar con un “bloque” y trabajar por medio de escisiones o, por el contrario, comenzar con una célula germinal para llegar a la forma definitiva por medio de adiciones como en una forma de orden de elementos repetitivos. Él apostaba rotundamente por la segunda y se ve muy claramente en sus dibujos y maquetas.

En esta paradoja se basaba su Polígono Funicular de Revolución (FPR), con él Intentaba demostrar cómo podemos tejer cables y generar una red de tensión a partir de una superficie mínima, rotando cables funiculares alrededor de diafragmas circulares de compresión y conectando la red de tensión a un elemento de compresión axial.

Se hizo una primera aproximación al sistema FPR, dividiendo la estructura entre compresión y tensión. Ambos grupos trabajaban de forma enérgica y se equilibraban gracias a la tensión. Para transmitir la tensión se utilizaron una serie de cables separados entre sí que conseguían una distribución uniforme del material en el espacio, llegando a asemejarse a una membrana

si no tenemos en cuenta los huecos, que tan importantes eran. Las vibraciones fundamentales que sufrían los cables eran contrarrestadas por la de sus armónicos, condición que era muy favorable si consideramos el problema del movimiento ondulatorio en los sistemas de cable sencillo, este sistema resolvía uno de los mayores problemas que tenían.

Para los elementos de compresión de diafragma cuya función era mantener la indeformabilidad de la red de cables, se escogió la configuración cerrada del toro, ya que conseguía el mejor uso del material.



Figura 26 – Pruebas de carga del Funicular Polygon of Revolution

En pruebas más avanzadas, vieron que colocar un tubo recto en la zona interna del sistema que se soportara las grandes tracciones del sistema, permitía una solución más económica para la zona más importante de compresión de la estructura.

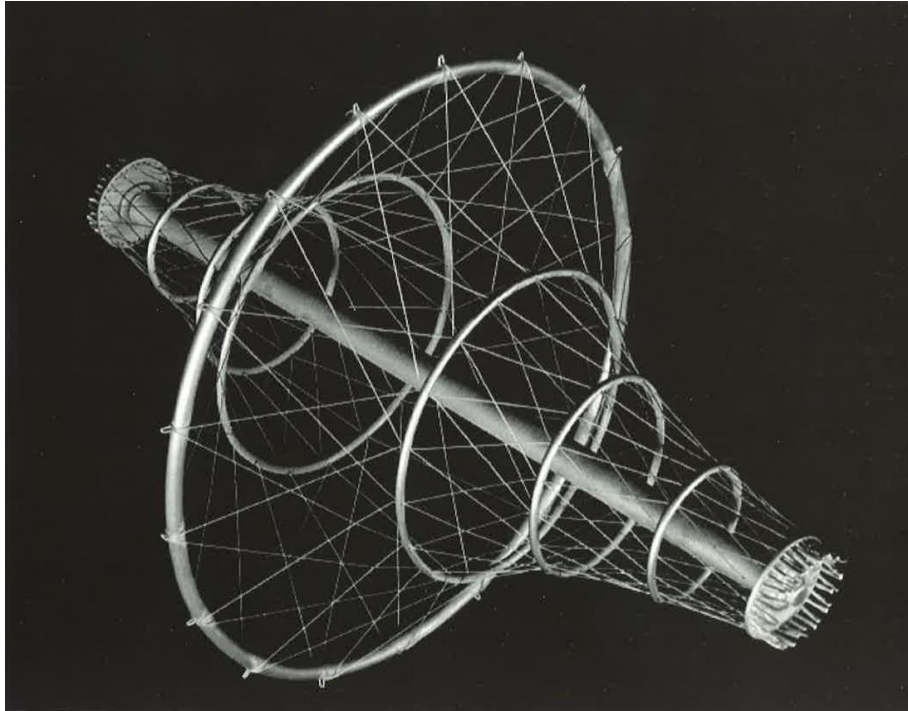


Figura 27 – Maqueta del Funicular Polygon of Revolution

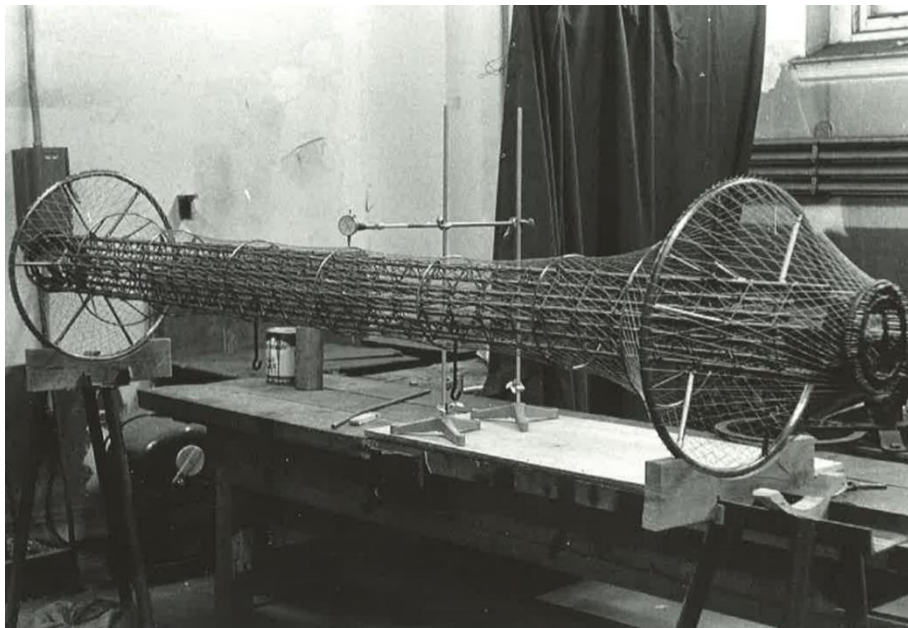


Figura 28 – Maqueta del Funicular Polygon of Revolution

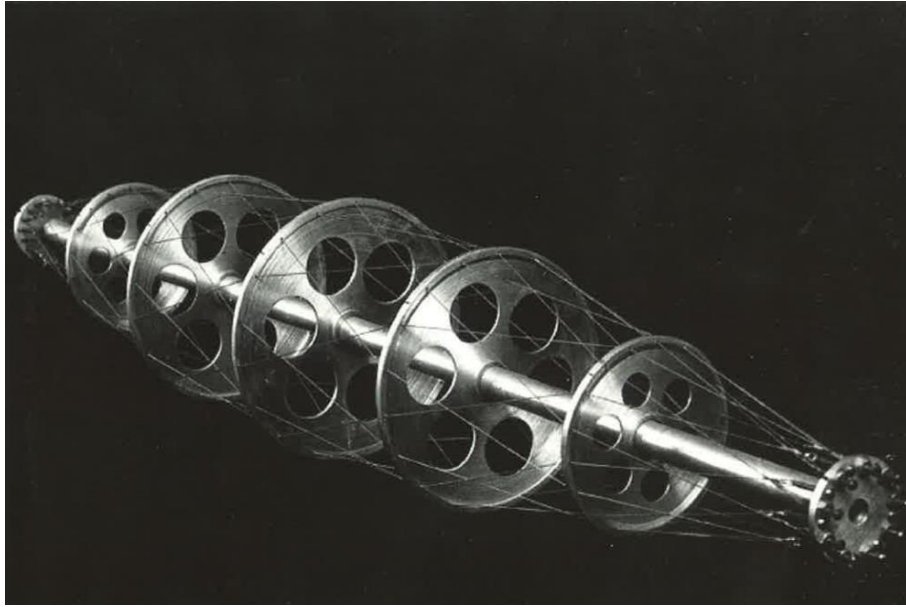


Figura 29 – Maqueta del Funicular Polygon of Revolution

Este sistema da la sensación de fragilidad, pero llegaba a soportar unas fuerzas muy elevadas, recordando el fenómeno de la cáscara de huevo, que parecía extremadamente sólido y al mismo tiempo era muy frágil.

Como se puede ver en las fotos, este sistema no es nada, pero tiende a ser algo. El mismo Ricolais lo planteaba en sus bocetos como un posible sistema de puentes, de edificios en altura o torres de alta tensión.

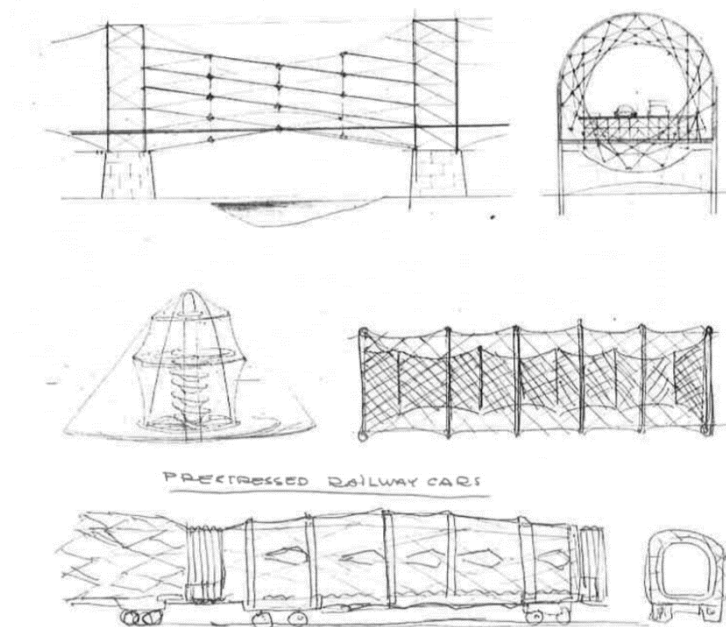


Figura 30 - Bocetos

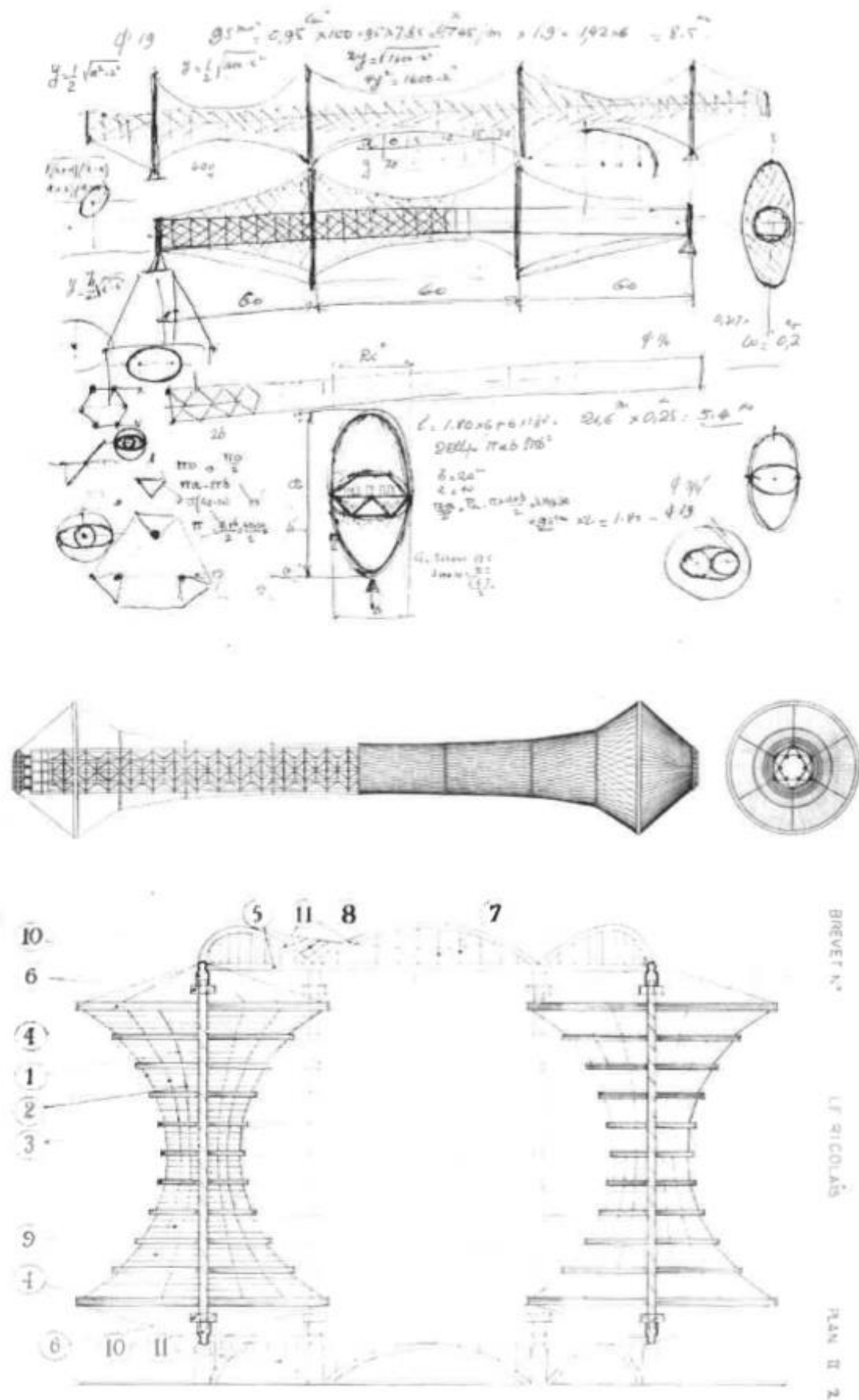


Figura 31 - Bocetos

04.2_ Más es menos

Esta paradoja, Ricolais la utilizaba para la circulación de los seres humanos, ya que cuantos más cruces y más largo sea nuestro recorrido entre dos puntos, peor será nuestra circulación. Él decía que conocemos mucho acerca del fluir de gases, fluidos y electrones, pero lo poco que sabemos sobre la circulación de los seres humanos.

Ricolais entendía que las ciudades se habían convertido en una especie de sistema nervioso que permite a las personas tomar contacto unas con otras y llegar a los trabajos y puntos de encuentro de la forma más rápida y corta posible, dejando atrás esas ciudades como Roma que contaban con su gran foro como elemento principal.

El crecimiento de la población y el aumento de los movimientos de las personas hizo que Ricolais se replanteara el objetivo de los arquitectos en el futuro, siendo la estructuración de la circulación en vez de la estructuración de los edificios.

Por este motivo analizó el sistema de ordenación de la circulación que había en ese momento, y sigue estando vigente en la actualidad, la malla ortogonal. Ricolais entendía los orígenes y los motivos por los cuales la malla ortogonal se había establecido como base para la organización de las ciudades, pero sentía la necesidad de proponer otra solución más eficiente para las ciudades de mayor tamaño del futuro.

Tras un análisis sistemático y topológico de los variados modelos de trazado basado en el estudio del número de intersecciones de una determinada y una unidad de longitud de segmento, llegó a la conclusión que una red triaxial era más eficaz que una biaxial o un sistema radial. Dicho sistema requería alejarnos del plano y aplicar una visión inteligente de las cosas por venir, es decir, alejarnos de lo convencional y adentrarnos en ideas innovadoras que cambien la forma de circular.

La red Trihex, propuesta por Ricolais, es un mosaico semirregular de hexágonos regulares y triángulos. Comparada con un trazado ortogonal en un espacio equivalente, siendo igual la longitud de las calles entre intersecciones, la red Trihex tiene un 18% menos de intersecciones, la suma de la longitud de las calles es menor en un 13.5% y el recorrido medio es alrededor de un 12% más corto.



Figura 32 – Maqueta red Trihex

La distribución triaxial proporciona también una potencialidad de combinaciones mucho más variadas que la distribución ortogonal, reduciendo el número de caminos, pero

aumentando la cantidad de uso de dichos caminos. Esto hace que dicho sistema responda a la paradoja de “cuantos más caminos existan, menos tendremos que usarlos”, es decir, “más es menos”.

El interés de Ricolais por los triángulos sobrepasa el campo de las estructuras y llega al campo de la circulación y del terreno, comprobando que un sistema de este tipo puede llegar a ahorrar más de un 30% de suelo respecto al sistema ortogonal.

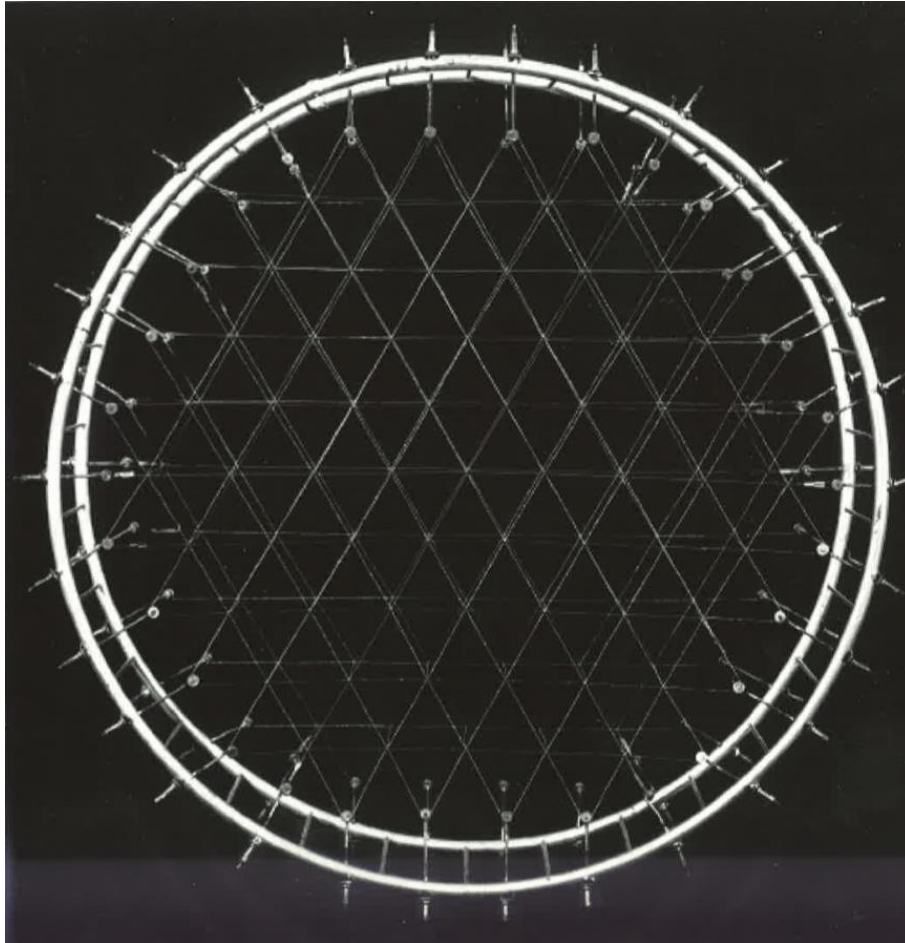
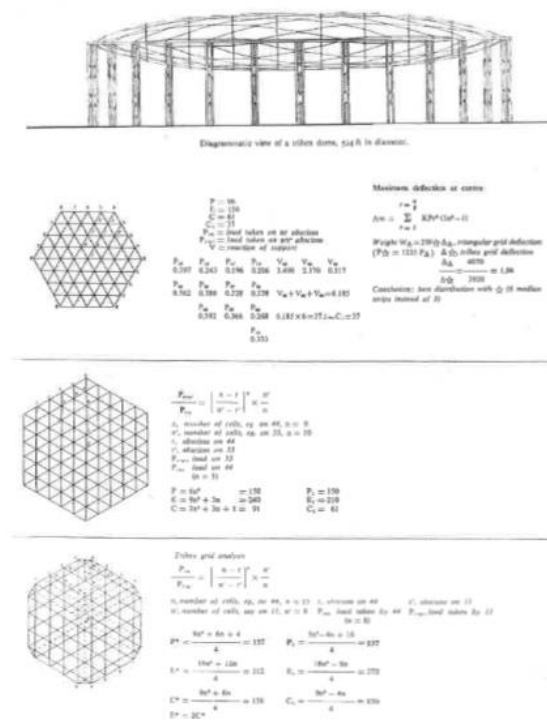


Figura 33 – Maqueta red Trihex



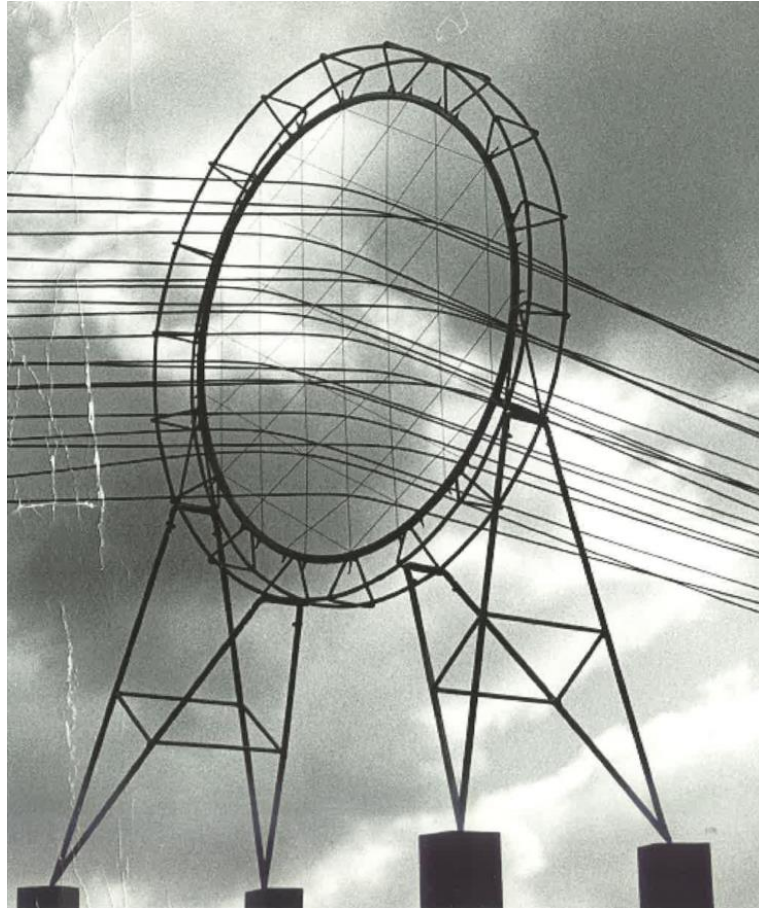


Figura 35 – Simulación Torre Alta Tensión

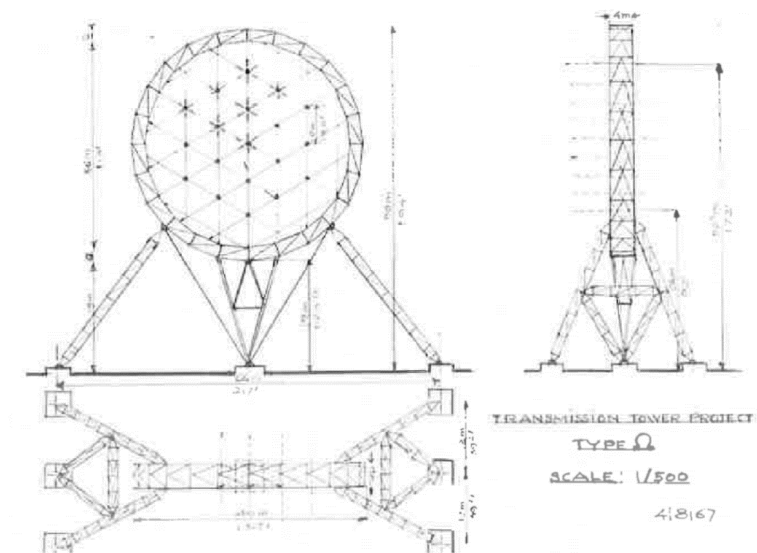


Figura 36 - Bocetos

04.3_ Una cuerda rígida y hueca

Ricolais tenía la obsesión por la idea de entrar en una cuerda. Es una forma de hablar, pero tenía obsesión por construir un sistema que trabajara como una cuerda, es decir, crear una cuerda rígida y hueca. La cuerda es una estructura perfecta, conseguir hacer una cuerda a mayor escala, vacía en su interior, que trabajara como si fuera una lámina extremadamente fina, pero sin llegar a deformarse dada su tensión.

Ricolais intentó encontrar la forma de hacer una cuerda hueca gracias a los tubos de red de tensión. Una red que cuantas más cadenas contenía, mayor era su resistencia y rigidez. Como hemos visto en el FPR, el arte de realizar una estructura eficiente descansa en una adecuada distribución del máximo número de huecos, conectados tan rígidamente como se posible a las cadenas que lo rodean.



Figura 37 – Maqueta Tube

La introducción de fuerzas en los sistemas era un recurso muy utilizado por Ricolais, ya que puede aumentar la resistencia de los materiales. Aumentar la resistencia equivale a reducir el peso y lo más importante para él era la posibilidad de que las fuerzas de la naturaleza abstracta podrían sustituir a los materiales pesados característicos gracias a estructuras que imitan a las leyes estructurales de la naturaleza que tenemos delante de nuestros ojos.

Esta red de tubos de tensión podría utilizarse como una red de tráfico elevado que pudiera a luz la vista aérea de la ciudad. Ricolais entendía que la forma de la ciudad es demasiado importante para que se pierda en el tráfico subterráneo o desde los limitados ángulos de calles estrechas, sino que se tiene que poder ver desde la altura.

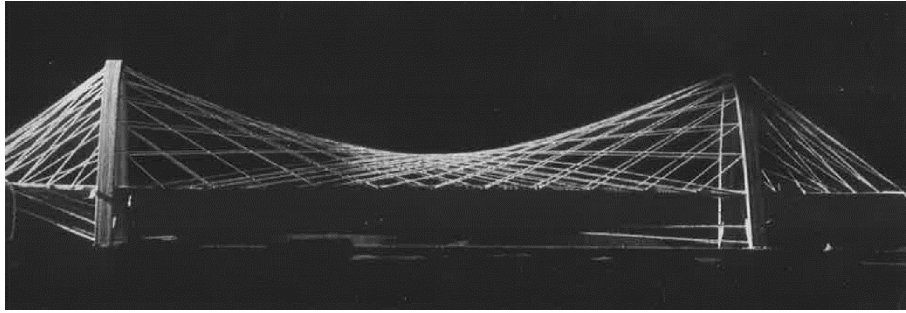


Figura 38 – Maqueta Tension Net Structure

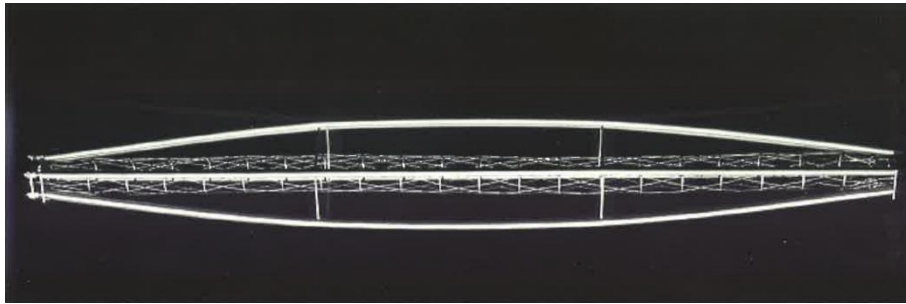


Figura 39 – Maqueta Tube

Esta forma de pensar de Ricolais caló en algunas ciudades como pueden ser las grandes ciudades asiáticas y americanas que cuentan con sistemas de tráfico elevado, pero no fue de las influencias más importantes que tuvo.

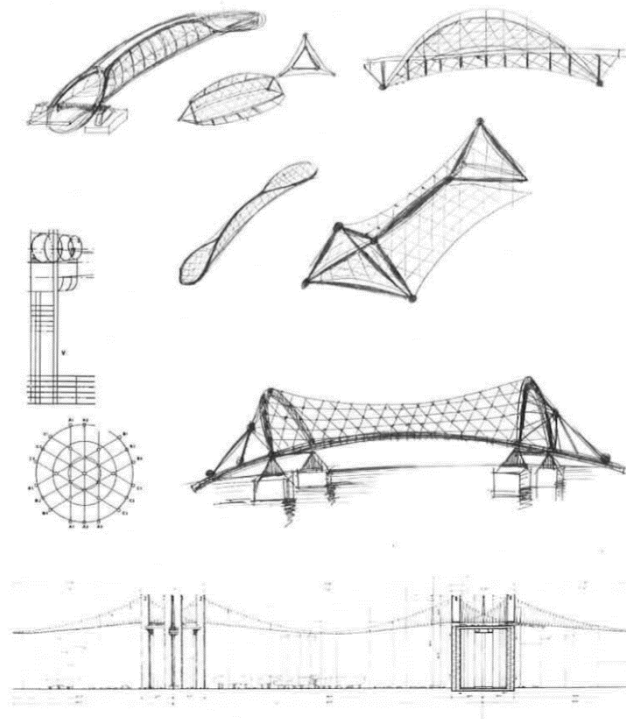


Figura 40 - Bocetos

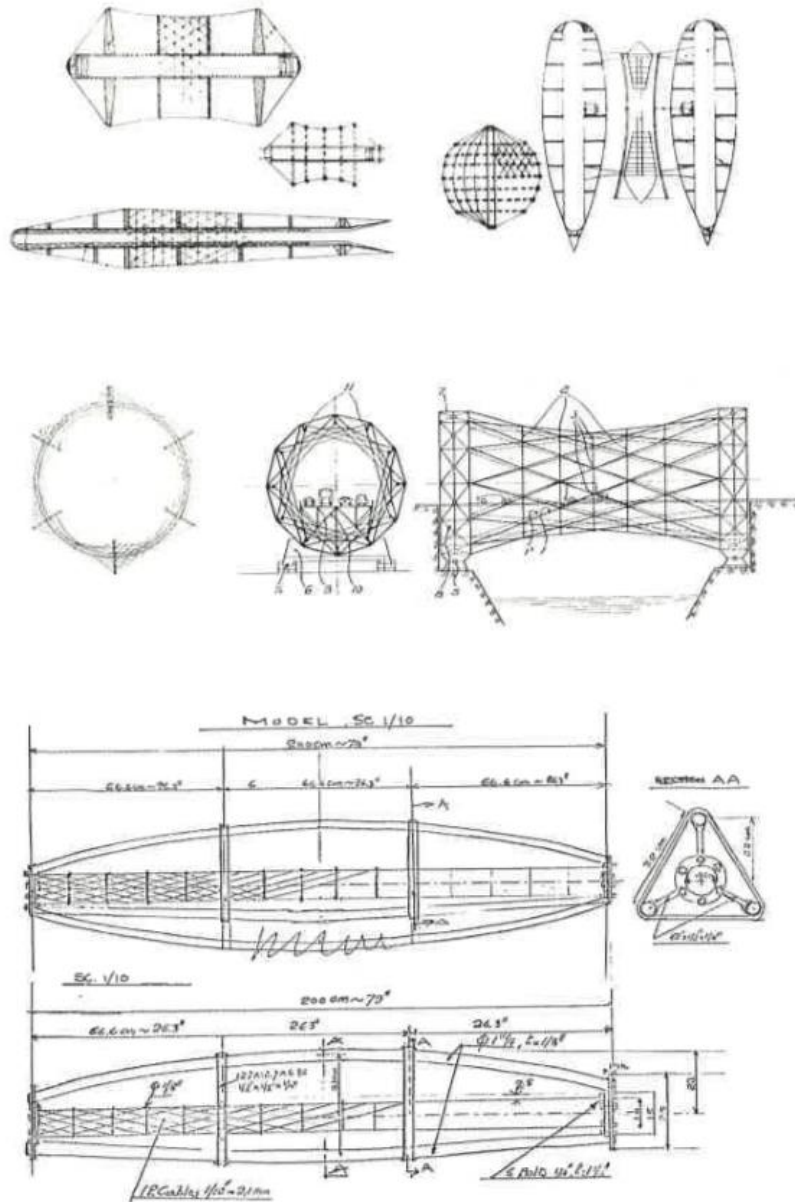


Figura 41 - Bocetos

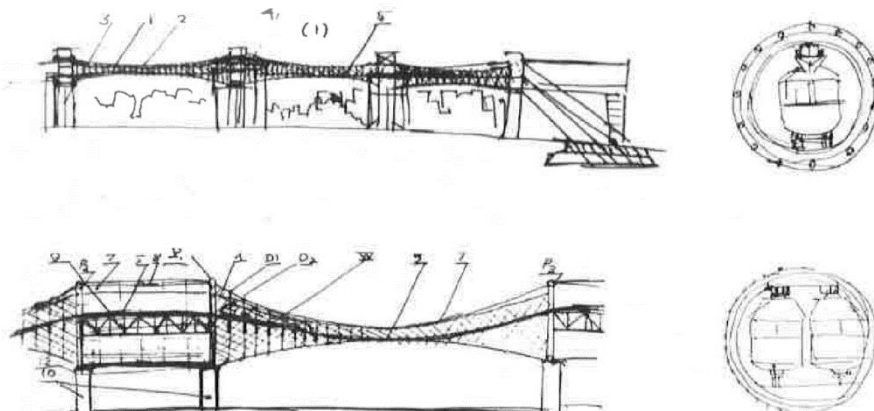


Figura 42 - Bocetos

04.4_ El orden de la destrucción sigue al orden de la construcción

Ricolais sabía que las láminas de metal onduladas contaban con unas cualidades especiales, una solución que encontramos ya en las antiguas construcciones con los estriados de las columnas griegas o, en la propia naturaleza con las ondas de las conchas.

Estas ondas son bastante útiles para conducir el agua de la lluvia, pero, sobre todo, la ondulación hace que el momento de inercia de la pieza aumente, aumentando su resistencia. Se trata de la repetición de la forma, esa especie de curva sin fin que se repite a lo largo de la pieza.

Se denominó forma automórfica a cualquier lámina de metal ondulada que se produce con periodicidad. Ricolais llevó a cabo un estudio en el cual quería comprobar como un tubo que tuviera una deformación constante en todo su perímetro funcionaba mejor que un simple tubo recto. A estos tubos que seguían las normas de las láminas de metal onduladas los denominó tubos automórficos y el sistema topológico fue el sistema Isoflex.

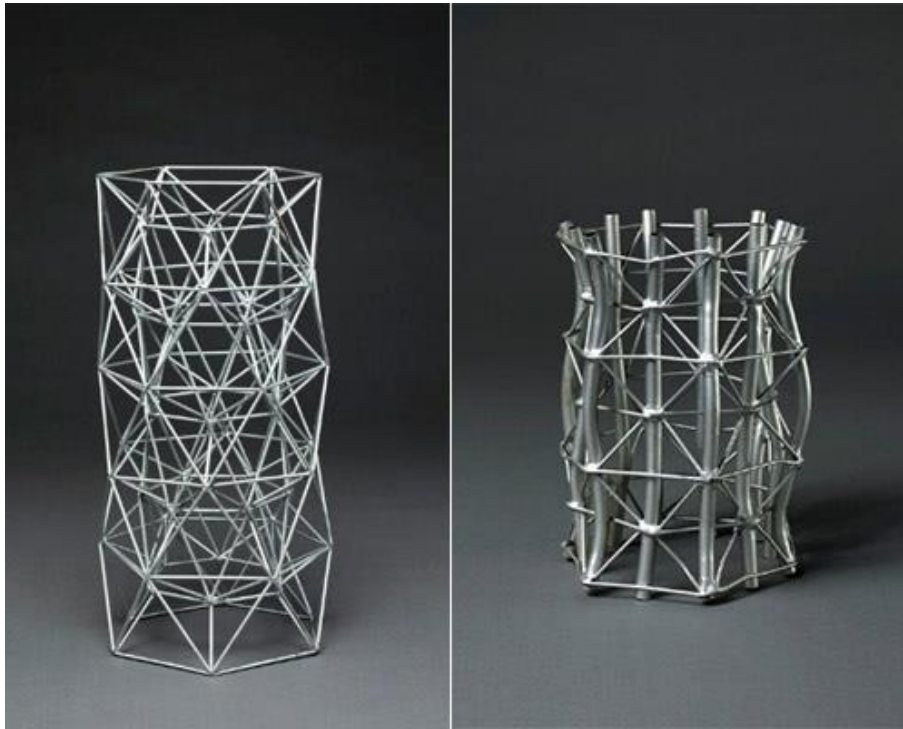


Figura 43 – Maquetas del Isoflex

Una de las primeras observaciones que se pudieron comprobar en el sistema Isoflex fue la reducción de forma considerable de las vibraciones que sufría el tubo. Por tanto, Ricolais llegó a la conclusión de que el estudio de las vibraciones puede llevar a la creación de nuevas formas. El proyecto consistía en una adecuada triangulación que evitara las deformaciones del tubo, utilizando el mismo peso del tubo para soportar las cargas axiales, al igual que en un delgado tubo.

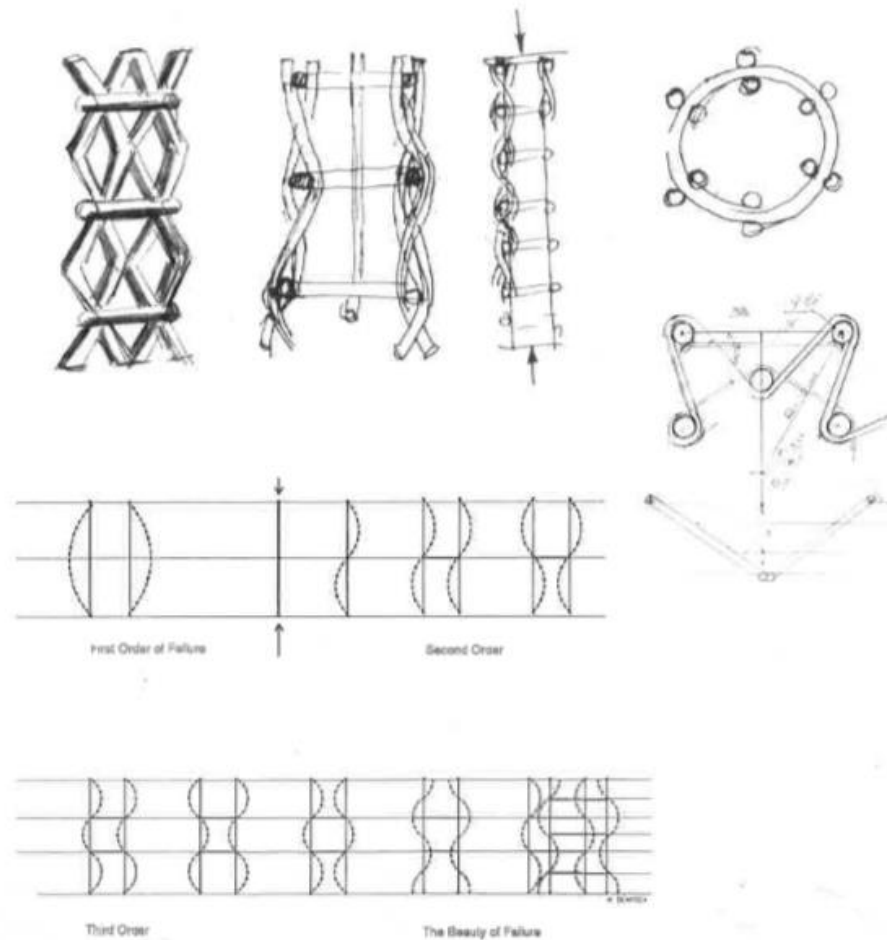


Figura 44 - Bocetos

El estudio consistía en encontrar una especie de sistema híbrido entre un revestimiento resistente y la triangulación. La idea era que, gracias a los huecos se encontrara una forma más ligera y más resistente que los tubos rectos convencionales de mitad del siglo XX, en otras palabras, la finalidad de la investigación era encontrar la forma óptima para un elemento de compresión axial de peso mínimo.

Durante el estudio, surgían deformaciones irregulares en los tubos ya deformados previamente, estas deformaciones se iban reduciendo gracias a la combinación de tetraedros y pirámides en el interior del tubo. El haz interior de tubos tendía a una curva convexa, mientras que el exterior lo hacía a una cóncava de mayor radio. Esta deformación armónica permitía a la mayor parte de la sección a trabajar en compresión, mientras la rotura tenía lugar en el límite elástico del material. Esto hacía, otra vez más, que el sistema trabajara en dos grupos que se contrarrestan, uno a compresión y otro a tracción.

En comparación con un tubo recto de diámetro y sección similares, el sistema Isoflex podía soportar unas fuerzas axiales de alrededor de un 25% mayores. Esto hacía que Ricolais llegara a una conclusión en la cual en algunos casos el orden de destrucción de un sistema según el orden de construcción.

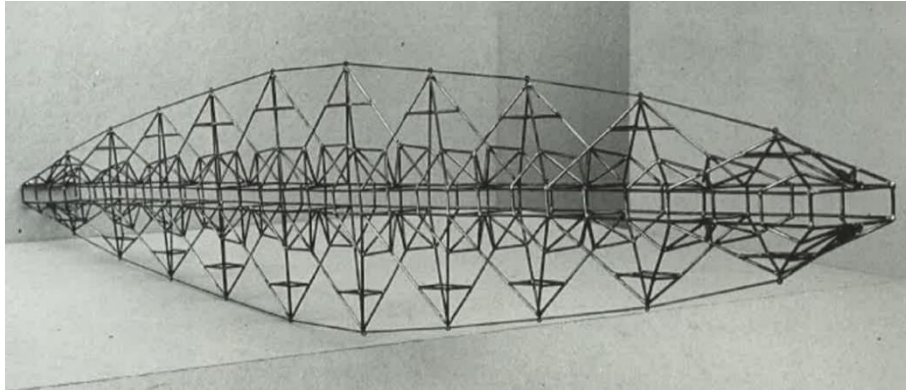


Figura 45 – Maqueta del sistema Octen

Este sistema Isoflex dio lugar a diferentes soluciones constructivas y solucionaba varias tipologías estructurales que eran comunes a la mayoría de estudios de Ricolais, como eran los edificios en altura, los puentes y las torres de alta tensión.

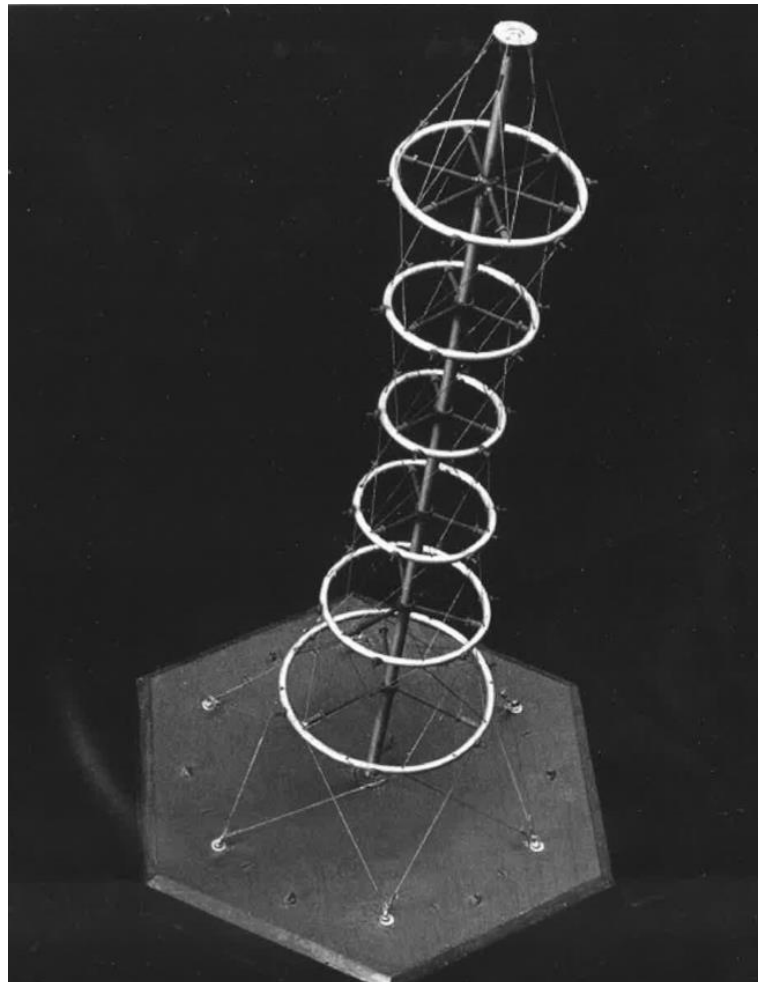


Figura 46 – Maquetas de Pretension Transmission

04.5_ Espejismo en la imagen

Ricolais llegó a estudiar muchas estructuras relacionadas con películas de jabón, ya que no hay mejor forma de aproximación al difícil concepto de la forma que los experimentos con películas de jabón, ya que en ellas encontramos las superficies mínimas o superficies de economía.

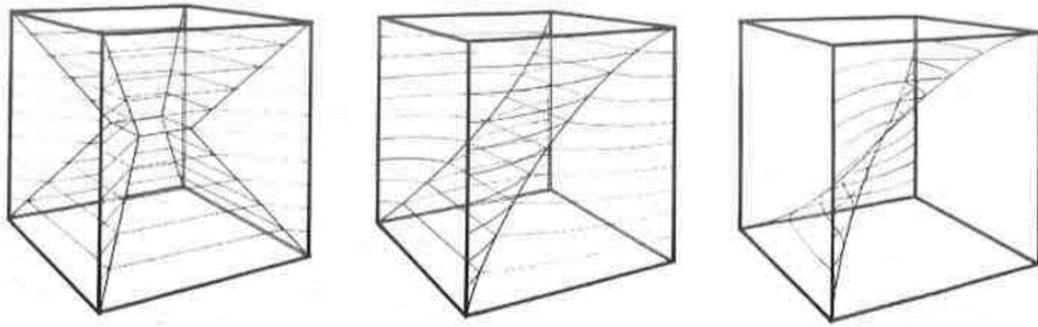


Figura 47 - Burbujas

Las películas de jabón sorprenden por su belleza y el rigor que muestran, las leyes fundamentales de la física se hacen perceptibles, unas leyes muy complejas que serían muy difíciles de explicar de forma abstracta.

Pero dicha película no posee realidad física, sino que es simplemente la mera imagen de la atracción de las moléculas. Ricolais se enfrentó a un espejismo de la imagen que fáilmente les podía engañar y no dejar ver lo que había detrás. Por este motivo, él utilizaba un proverbio chino que decía: “Las cosas mienten igual que sus imágenes”.

La primera parte de los experimentos consistió en relacionar las películas de jabón con algunos poliedros bien definidos, los cuales se perforaban de forma sistemática sus caras para descubrir de forma experimental su comportamiento. Después se sumergió ese marco hexagonal en una solución jabonosa, obteniendo una superficie con doble curvatura, una especie de tela de araña tridimensional que denominaron “la silla de montar de mono” (“Monkey Saddle”).



DEVELOPMENT OF MONKEY SADDLE WITH SOAP FILM

Figura 48 - Estudios



Figura 49 – Maqueta del Monkey Saddle

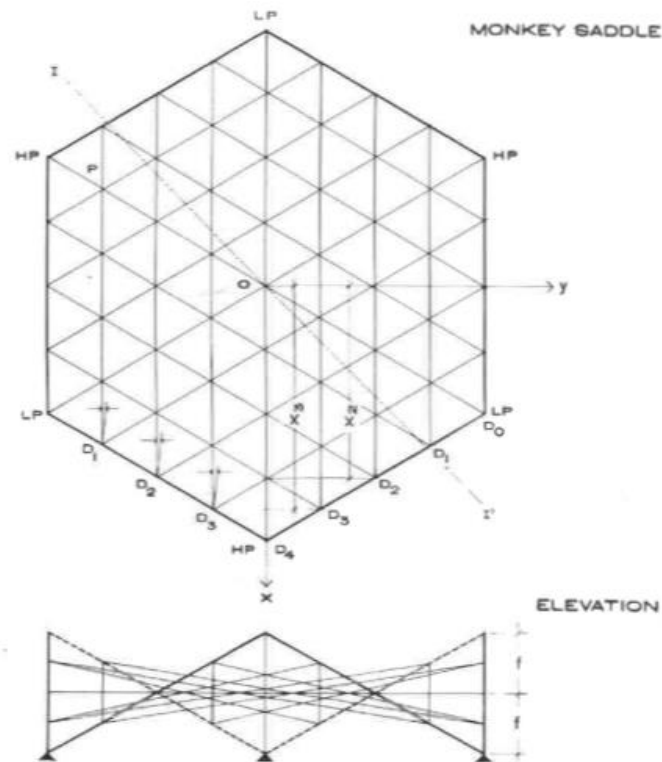


Figura 50 - Bocetos

Esta solución hexagonal en planta y con curvatura convexa, les fue muy interesante de elegir, puesto que se acercaba a la solución más óptima para obtener la mayor superficie para un perímetro dado. Además, con un plano hexagonal la membrana de la película era fácilmente en una red triangular donde la distribución de los cables de tensión era triaxial, que como vimos en la red Trihex, era más eficaz que la biaxial.

Una primera aproximación de tres valles y tres alturas, que posteriormente se experimentó aumentando los valles y alturas, llegando a ser una superficie de 6 valles y 6 alturas dentro del mismo hexágono. Dicha red triaxial dio paso a tetraedros y octaedros que configuraban la estructura y le daban la resistencia adecuada para que el sistema se pudiera construir de forma modular.

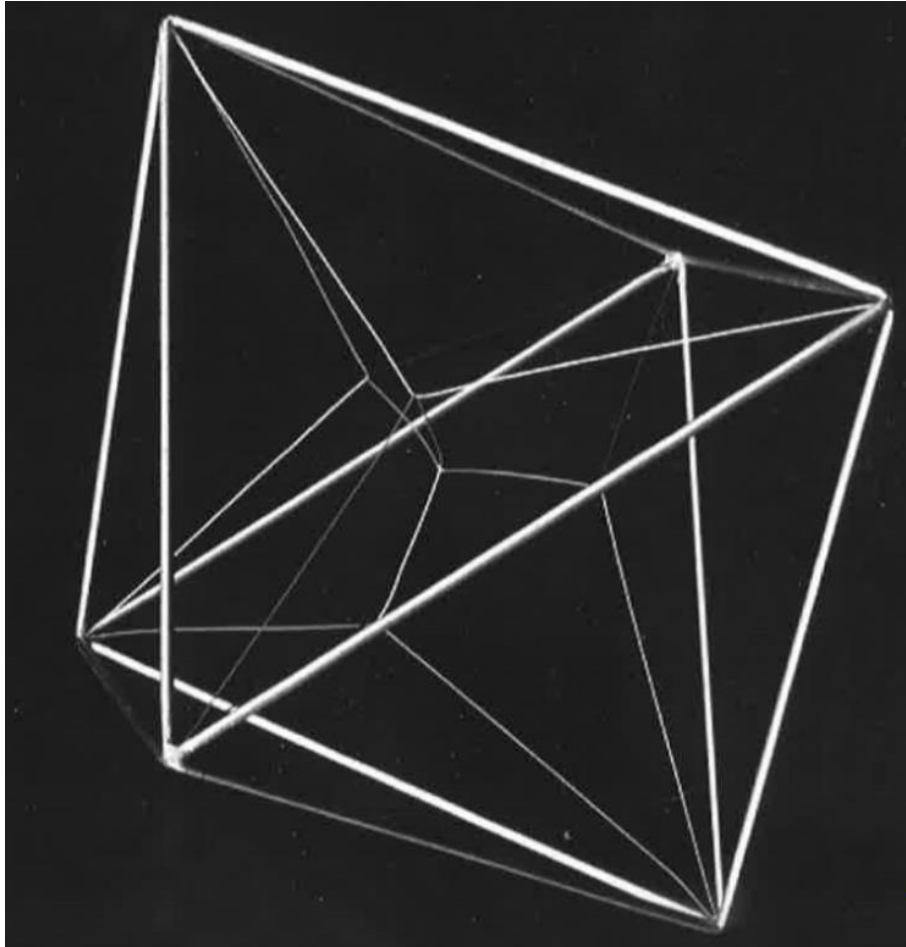


Figura 51 – Maqueta del Octaedro

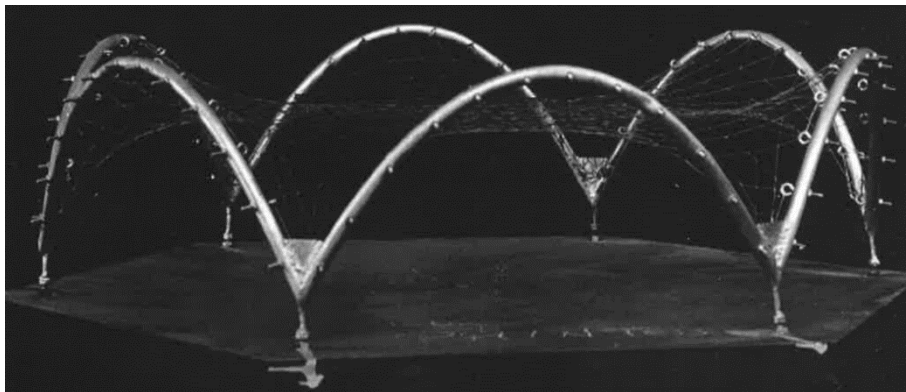


Figura 52 – Maqueta del Monkey Saddle

Una observación importante durante la experimentación fue que la estructura se comportaba ostensible mejor si los elementos se encontraban pretensados, siguiendo la teoría del pretensado que se estaba desarrollando en ese mismo momento en los países más avanzados constructivamente.

Esta mejora del comportamiento gracias al pretensado, permitía que el sistema se pudiera utilizar para estructuras que cubrían superficies de grandes dimensiones como pabellones o grandes cubiertas temporales.

04.6_ Estructuras ligeras con elementos pesados

Con el paso del tiempo, Ricolais se dio cuenta del error que suponía afirmar que el arte de construir estructuras ligeras es construir con elementos ligeros, puesto que el grupo de elementos ligeros será ligero. Le llevó tiempo, pero al final comprendió que para construir una estructura ligera hay que utilizar elementos grandes y pesados. Una paradoja más dentro de la carrera investigadora de Ricolais.

Esta conclusión que le llevó muchos años, se basaba en que la parte que más pesa de las estructuras ligeras eran las uniones. Por tanto, la cuestión era cómo reducir el número de uniones, si los elementos eran pequeños y ligeros el número de uniones era muy superior a si la estructura estaba formada por grandes elementos pesados.

Gracias a la industrialización de perfiles de cualquier material de construcción permite producir longitudes infinitas siempre que puedan ser transportadas hasta la obra. El hecho de cortar esos perfiles en muchas piezas pequeñas y después, ya en obra, volverlos a unir por medio de pesadas y costosas juntas, a Ricolais le parecía un esfuerzo altamente inútil con la tecnología que existía.

Por este motivo, el estudio de Ricolais se basó en encontrar un sistema en el cual se redujera al máximo el número de intersecciones, haciendo que la estructura fuera más barata y más ligera.

Una primera aproximación experimental llevó a un sistema estructural en el que las juntas se reducen a un simple anillo en cada vértice de los elementos conectados, lo que le permitía utilizar elementos continuos, superpuestos, para cada una de las redes. El sistema carecía de abrazaderas, la fricción era suficiente para garantizar la estabilidad.

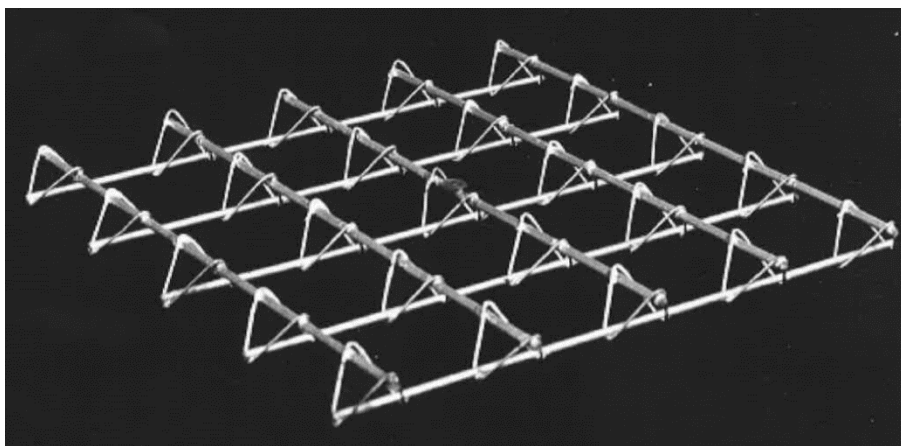


Figura 53 – Maqueta del Sistema Tetragrid

Esta primera aproximación era la más óptima, puestos que el número de barras y de juntas se reducía al máximo, pero no era posible llegar a construirse. Por este motivo, Ricolais desarrolló el sistema Tetragrid.

Este sistema se basaba en los mismos conceptos que la primera aproximación, pero añadiéndole un elemento tetraédrico que une ambos cordones de la estructura que hacía que se pudieran controlar las deformaciones que sufría la estructura. Con este sistema Tetragrid,

Ricolais llegó a elaborar diferentes soluciones en las que iba variando la geometría de la cubierta.

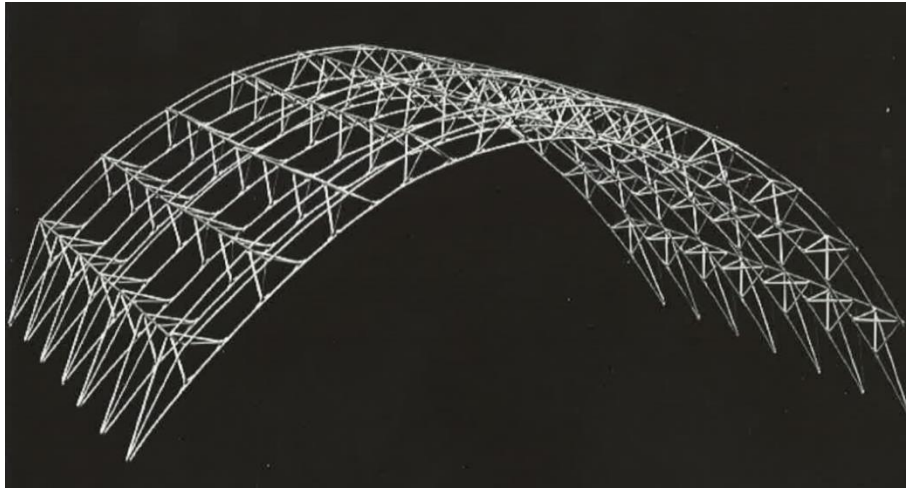


Figura 54 – Maqueta del Sistema Tetragrid

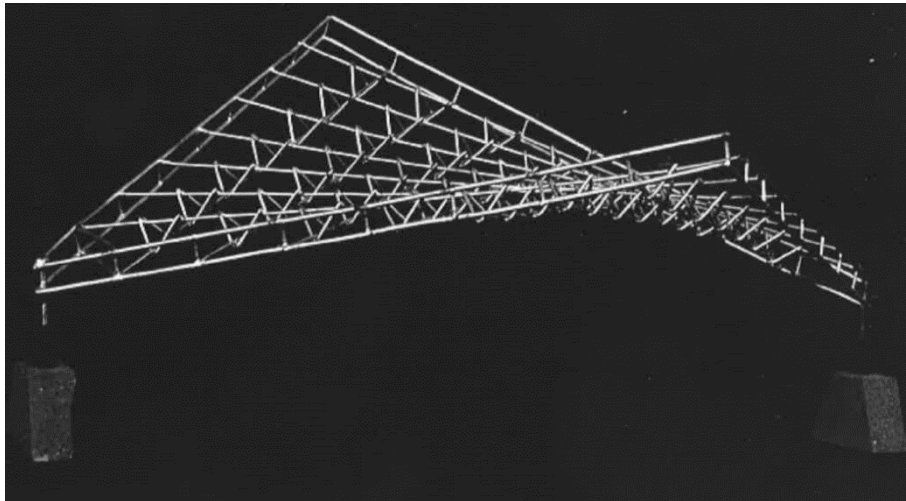


Figura 55 – Maqueta del Sistema Tetragrid

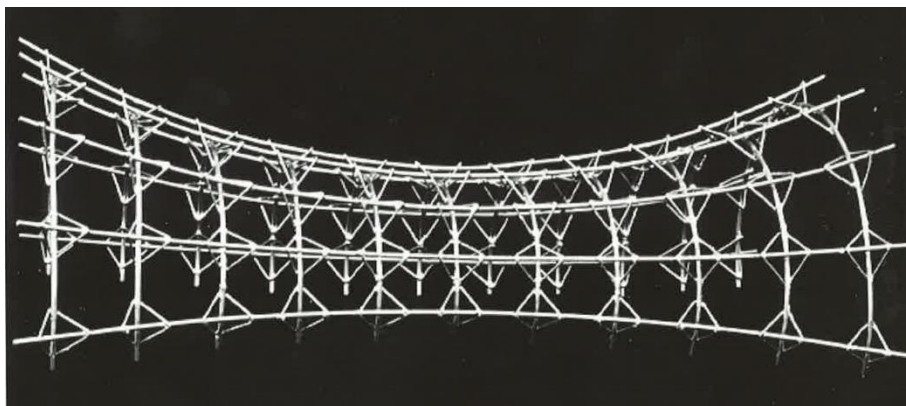


Figura 56 – Maqueta del Sistema Tetragrid

En el sistema Tetragrid se reducía el número de barras, el número de juntas y el número de barras por juntas, puesto que la sección de las juntas era otro factor económico muy importante. Esta reducción en el coste de las barras y las juntas cubría con creces el aumento de sección de los elementos.

Puesto que la junta es el elemento más problemático del sistema, se hace una única solución para las juntas, esto hace que dicho módulo se vaya repitiendo por toda la estructura y sea fácil de controlar y ejecutar.

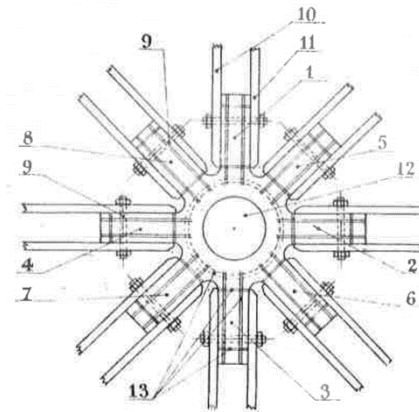


Figura 57 – Boceto Nudo Apex

Al trabajar con estructuras automórficas, Ricolais llegó a la conclusión que una estructura indeterminada era más fácilmente concebida y, algunas veces, de construcción más sencilla. Esto hacía que muchas veces desarrollase sistemas indeterminados que se fueran desarrollando según las condiciones existentes en obra como son la ubicación, la escala o el propio material de construcción. Otra paradoja más que añadir en la carrera de Robert Le Ricolais.

Esta configuración Tetragrid la veremos con mayor detalle posteriormente en el apartado de estudio y propuesta, ya que ha sido el sistema escogido a desarrollar.

04.7_ Columnas suspendidas en el aire

Como hemos visto, muchas de las maquetas experimentales de Ricolais se basaban en cubiertas curvadas construidas a base de cerchas. Unas cerchas que combatían la curvatura o la sustituían por tensión y compresión. Basándose en estos principios de anular la curvatura, comenzó a utilizar los postes King y Queen, los cuales reemplazaban la curvatura por compresión en la parte superior y tensión en la inferior.

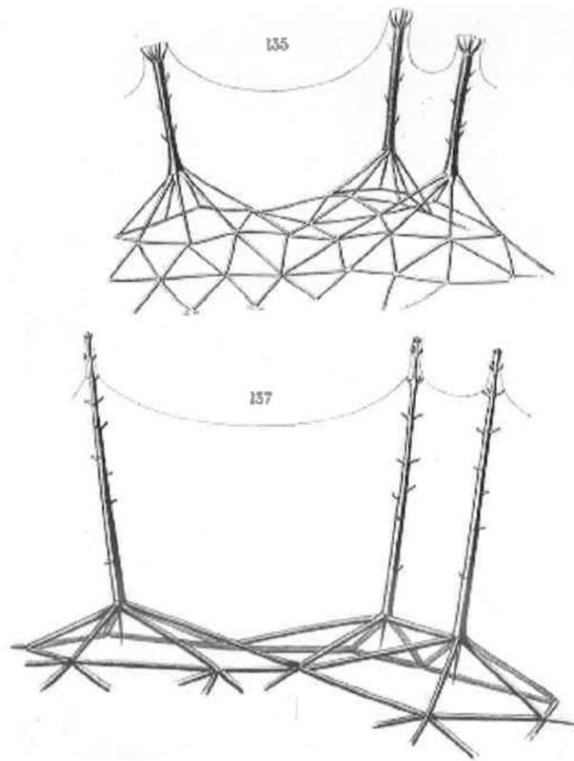


Figura 58 – Postes King y Queen

Unos postes suspendidos en el aire, unos soportes ficticios, una paradoja más en los experimentos estructurales de Ricolais. Esta forma de enlazar dos elementos, que son opuestos, de forma que sean compatibles. Al igual que Ricolais hacía en otras topologías, dividir la estructura en dos grupos que se compensan, uno a compresión y otro a tracción. Esto causó un gran impacto en la evolución de las estructuras, ya que las optimizaba.

Esta optimización, reducir el peso de la estructura al máximo, algo que obsesionaba a Ricolais, hizo que llegara al sistema Polyten. Un sistema que se basaba en el Queen Post como una célula germinal repitiéndose dentro de sí misma, llegando a aumentar cada vez más la luz entre los apoyos.

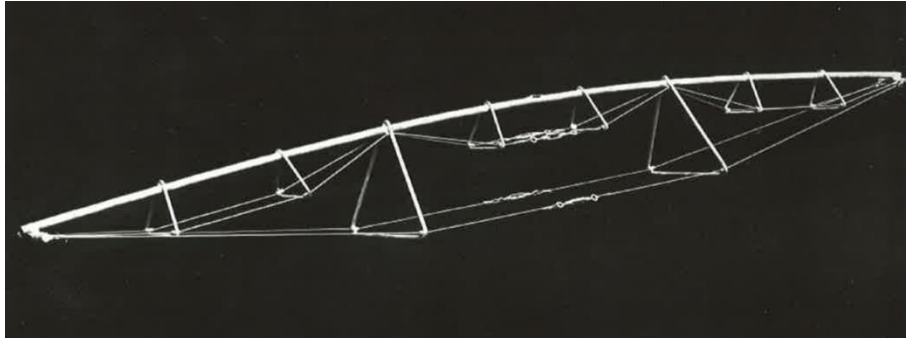


Figura 59 – Maqueta del sistema Polygen

Un sistema que se podía multiplicar de forma que aumentaba también su ancho sin aumentar de canto ni excesivamente de peso.



Figura 60 – Sistema Polygen triplicado

Pero Ricolais no solo se quedaba ahí, sino que probó diferentes posibilidades de combinar el sistema Polygen, llegando a proponer diferentes tipos de puentes o cubiertas.

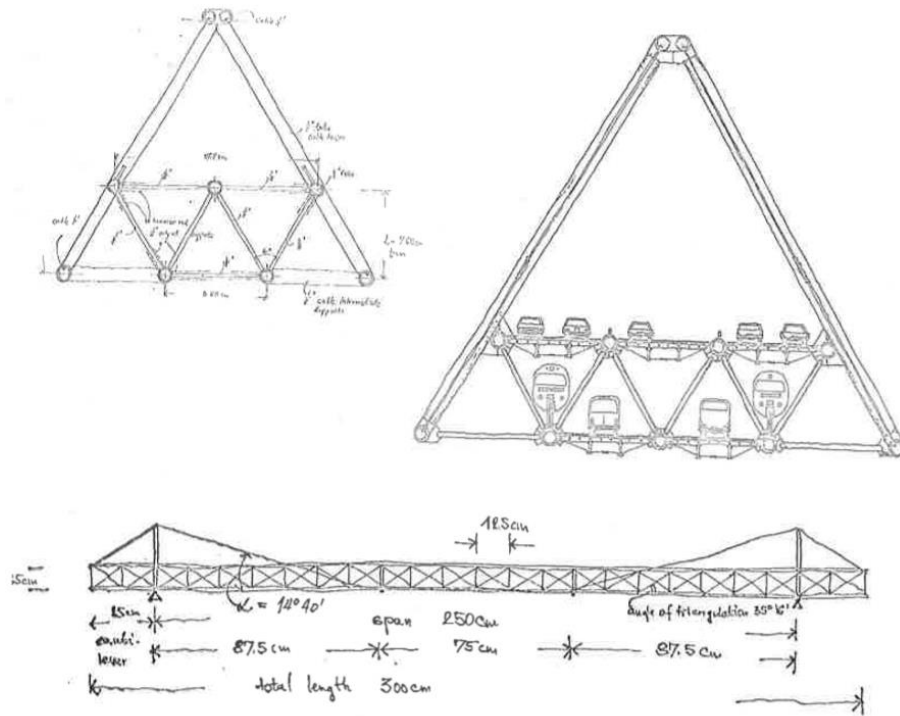


Figura 61 – Bocetos del sistema Polygen como puente

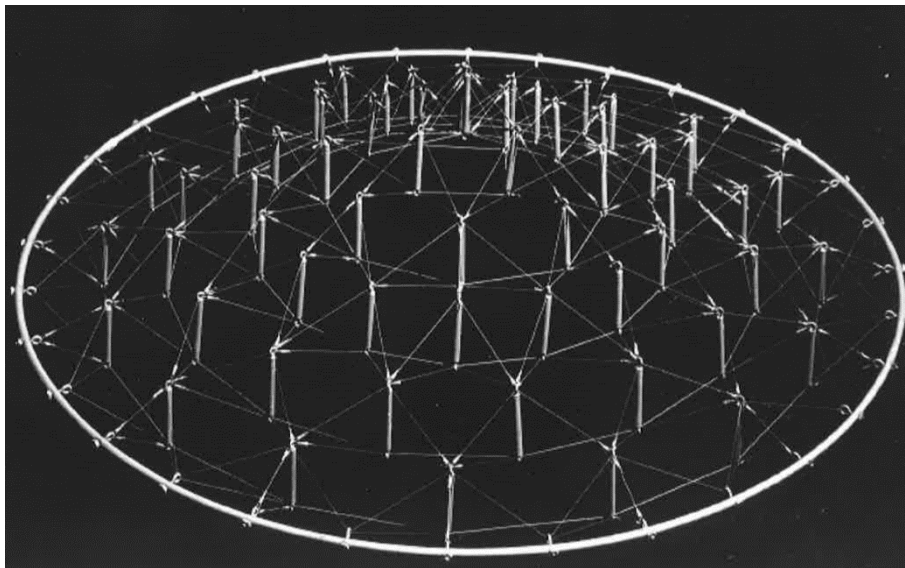


Figura 62 – Maqueta del sistema Polygen como cubierta

Este es un ejemplo más de como de una topología que no era nada en específico, con diferentes combinaciones y dimensiones, se puede llegar a proponer diferentes tipologías como son una cubierta o un puente para el transporte.

04.8_ Conclusión

Después de ver los principales sistemas topológicos que Ricolais, podemos decir que durante los años en Estado Unidos trabajó e investigó junto a sus alumnos de forma exhaustiva, pero sus investigaciones no fueron exitosas en su momento.

Como él mismo cuenta en una entrevista realizada por Peter McCleary, James Bryan Y Rolf Saber, editores de Vía II “estructuras: implícito y explícito”, publicada por la Graduate School of Fine Arts de la University of Pennsylvania, el éxito era algo que le preocupaba al principio de empezar las investigaciones, pero si llega a tener éxito en un principio no habría realizado otros descubrimientos importantes que hizo posteriormente.

Ricolais no era una persona que trabajara por dinero, sino que trabajaba porque disfrutaba de su trabajo. Era una persona que se sentía inventor y no podía dejar de investigar y experimentar.

En dicha entrevista, resalta que su mayor logro fue conseguir una institución que le proporcionara las instalaciones necesarias para experimentar con estructuras y pudiera seguir investigando sobre estructuras espaciales, mejorándolas y enseñándolas a los arquitectos del futuro.

Encontrar a alguien que apostara en él y pusiese dinero para que sus propuestas se hicieran realidad fue el paso más difícil para Ricolais, esto hizo que tuviera que dedicarse a la investigación y la docencia exclusivamente y no llegara a construir todo lo que le hubiera gustado en el momento.

Pero que nadie apostase en subvencionar sus propuestas y no llegara a construir grandes arquitecturas no quiere decir que Ricolais no dejara influencia y no fuera importante para los arquitectos de su época y posteriores. Aunque los mayores reconocimientos se le dieron en sus últimos años de vida y una vez ya fallecido, como suele pasarles a los genios incomprensidos, fue una persona que influyó de forma decisiva en la evolución de las estructuras tridimensionales y de los edificios en altura.

Otra influencia que tuvo fue en el apartado estético, ya que sus maquetas eran muy atractivas y sirvieron de referencia a obras conocidas del siglo XXI. Unas influencias que aparecieron por el factor estético pero que fueron capaces de ser ejecutadas debido a la buena documentación que Ricolais hacía de cada uno de sus trabajos.

05_ INFLUENCIAS

A pesar de no llegar a construir grandes obras, sus estudios sí que calaron en otros arquitectos que llegaron a construir mucho más que él. A continuación, vamos a ver las principales influencias respecto a las estructuras espaciales que tuvo Ricolais en los arquitectos e ingenieros de su época y posteriores, hasta llegar a la actualidad.

05.1_ Estructuras espaciales

Existen un gran número de arquitectos de renombre que se han referenciado en Ricolais a la hora de diseñar sus mejores obras. En este apartado vamos a centrarnos en los arquitectos más conocidos y en las obras en las que está vigente la figura de Robert Le Ricolais.

Louis Kahn	
Obra/s	City Tower
Año	1952-57
Influencias	<ul style="list-style-type: none"> - Estructuras trianguladas - La importancia de dónde colocar los huecos - Estructura como organización

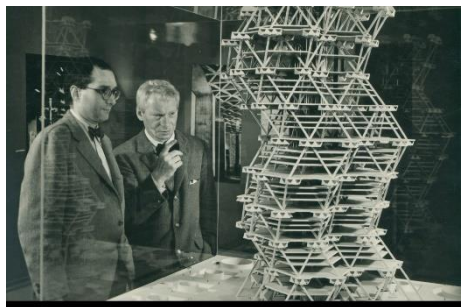


Figura 63 – Kahn y Ricolais

La relación entre Ricolais y Kahn fue muy estrecha, ya que trabajaban juntos en la asignatura de Proyectos en el Mater de Arquitectura de la Universidad de Pensilvania. Esto hizo que compartieran muchos conocimientos y que tuvieran una forma similar de ver la arquitectura, aunque fueran muy diferentes.

La mayor influencia que tuvo Ricolais sobre Kahn fue a la hora de cómo entender la estructura, ya que ambos entendían la estructura como el elemento que organiza el espacio en un edificio, diferenciando los espacios servidos de los sirvientes y dando importancia a dónde se colocaban los huecos.

Al trabajar juntos, encontramos muchas obras en las que podemos ver la influencia de Ricolais, pero vamos a centrarnos en una en especial, la City Tower. También se le conoce a este edificio como el Rascacielos Tetraédrico de Hormigón, como su nombre indica, estaba compuesto por tetraedros de hormigón y se elevaba hasta los 20 metros de altura, una gran hazaña en la época al estar proponiendo una nueva tipología estructural para los edificios es altura.

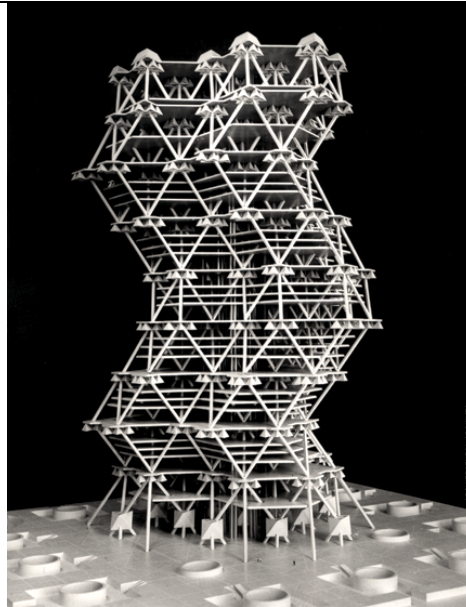
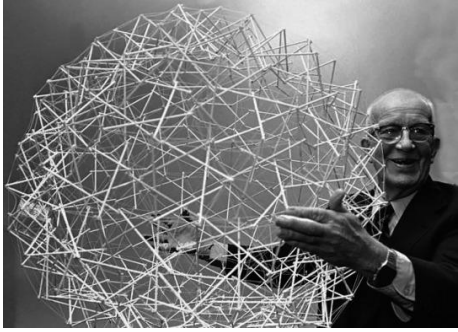


Figura 64 – City Tower

A pesar de ser innovadora, la City Tower no se llegó a construir debido a que la forma triangulada hacía que se utilizara únicamente el 80% del espacio útil, algo que no era del gusto del propietario, esto hizo que no se llegara a ejecutar. Pero gracias al uso de las maquetas, la propuesta ha podido llegar hasta nuestros días y podemos observar la influencia que las estructuras trianguladas tridimensionales de Ricolais tuvieron sobre la arquitectura de Louis Kahn.

 <p><i>Figura 65 - Fuller</i></p>	Buckminster Fuller	
	Obra/s	Geodésicas Dymaxion House
	Año	1948 1933
	Influencias	<ul style="list-style-type: none"> - Estructuras ligeras - Estructuras trianguladas - Estructura como parte más importante del edificio

Cuando hablamos de Fuller y Ricolais, estamos hablando de dos de las personas más influyentes en el mundo de las estructuras a mediados y finales del siglo XX. Dos personas que buscaban siempre la ligereza de las estructuras y se apoyaron en las estructuras trianguladas como la base de sus estudios.

Fuller destacó, sobre todo, con las geodésicas. Unas geodésicas que se diferenciaban de las cúpulas de Ricolais por tener muchas más barras de menor tamaño. Este punto generó controversia entre ambos, ya que Ricolais apostaba por barras más grandes y pesadas, reduciendo el número de nudos, que para él era el punto más pesado de la estructura.

Otra cosa en común que tenían ambos era que comenzaron a hacer propuesta de futuro, propuestas de viviendas con innovaciones estructurales que organizaban el espacio. Fuller tenía la Dymaxion House y Ricolais el Esferovector, ambas de ellas muy similares y se podían ver la influencia que tenía el uno sobre el otro.

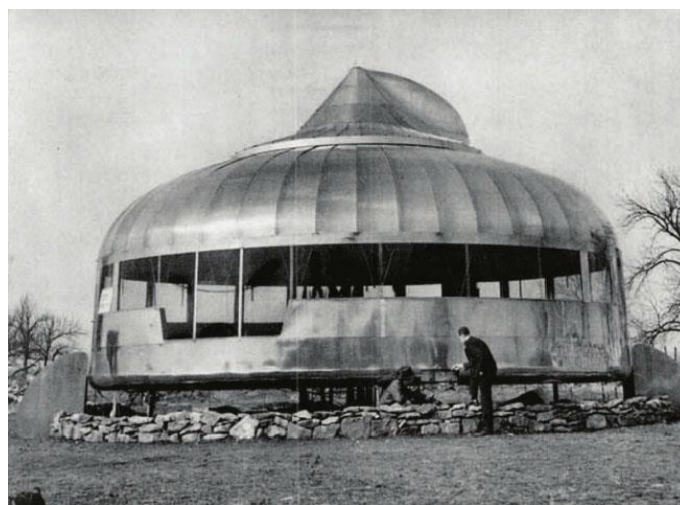



Figura 66 – Dymaxion House

 <p><i>Figura 67 - Nervi</i></p>	Pier Luigi Nervi	
	Obra/s	Hangares
	Año	1940
	Influencias	<ul style="list-style-type: none"> - Estructura espacial - Optimización de la estructura

Ricolais y Nervi fueron los dos ingenieros que fueron padres de la arquitectura espacial, ambos tienen en común la tridimensionalidad de sus estructuras, la optimización del material y la economía.

A pesar de que no llegaron a coincidir, ambos conocían los estudios del otro y apostaban por las matemáticas para crear sus estructuras. Gracias a las matemáticas llegaban a construir estructuras relativamente ligeras para el área que cubrían y, sobre todo, estructuras que tenían un gran atractivo visual por sus geometrías y su composición.



Figura 68 – Hangar militar

Nervi consiguió construir más que Ricolais, ya que en Italia realizó muchas arquitecturas relacionadas con el ejército. Se puede decir que ambos apostaban por la estructura como elemento principal de la arquitectura y consiguieron crear tipologías muy atractivas.

	Kenzo Tange	
	Obra/s	Pabellón de Japón, EXPO Osaka
	Año	1970
	Influencias	<ul style="list-style-type: none">- Estructura triangulada- Ligereza- Sistema Tetragrid- Importancia de los nudos

Figura 69 - Tange

En cuanto a Kenzo Tange, tenemos que destacar el Pabellón de Japón en la EXPO de Osaka de 1970. Una gran estructura triangulada, utilizando un sistema muy parecido al Tetragrid de Ricolais. Llegando a crear una estructura ligera capaz de cubrir una gran superficie.



Figura 70 – Pabellón de Japón, EXPO Osaka 1970

Como podemos observar, la estructura se basaba en dos cordones estructurales horizontales unidos por barras en diagonal, formando tetraedros, al igual que Ricolais en el sistema Tetragrid. Un sistema que funcionaba muy bien para grandes cubiertas puesto que era capaz de cubrir una gran superficie con un peso propio ligero. El nudo era el punto más importante de la estructura y Tange lo soluciona con nudos en forma de esfera metálica a la que se unen las barras en forma de articulación, una alternativa más de nudo del sistema Tetragrid.


	Konrad Wachsmann	
	Obra/s	USAF Aircraft Hangar
	Año	1951
	Influencias	- Estructura triangulada - Importancia de los nudos - Estructuras ligeras cubriendo grandes espacios

Figura 71 - Wachsmann

Konrad Wachsmann fue otro de los arquitectos que a mediados del siglo XX apostó por las estructuras trianguladas para construir estructuras ligeras de grandes dimensiones. Él apostó también por el tetraedro como módulo original que se iba repitiendo por toda la estructura. Una estructura compuesta por pequeñas barras ligeras, Ricolais prefería barras de mayores dimensiones conforme fue desarrollando el sistema.

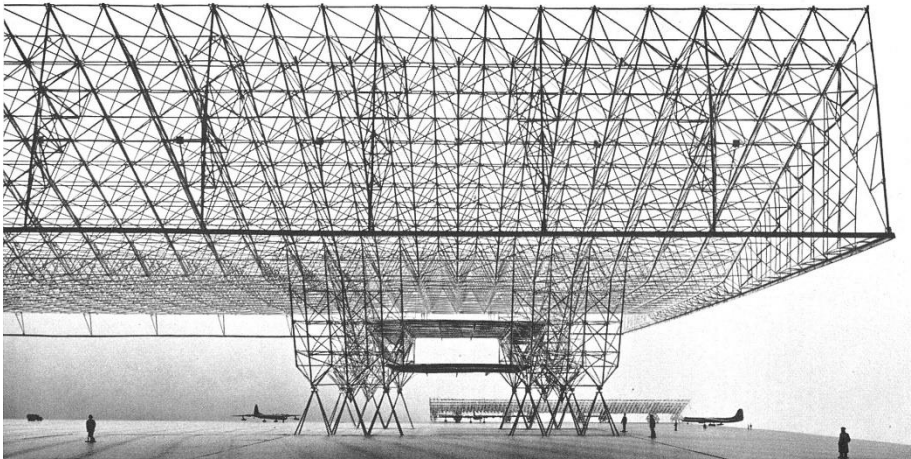


Figura 72 – USAF Aircraft Hangar

Una estructura en la que el punto más importante eran los nudos, unos nudos que Wachsmann diseñó con gran detalle para que nada fallara y la estructura se construyera de forma rápida y eficaz.

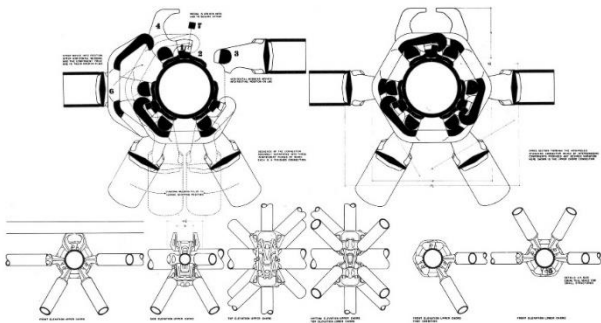
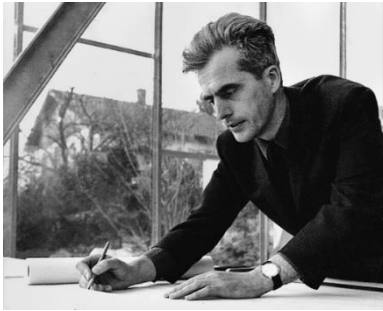


Figura 73 – Diseño nudo

 <p><i>Figura 74 - Otto</i></p>	Frei Otto	
	Obra/s	Deutscher Pavillon, Montreal
	Año	1967
	Influencias	<ul style="list-style-type: none"> - Ligereza - Grupo trabajando a compresión y grupo a tracción - Estudio de la naturaleza, cáscaras


Frei Otto fue otro de los grandes arquitectos del siglo XX que apostó por la estructura como elemento principal de su arquitectura. Otto se especializó en estudios de la naturaleza, como Ricolais, sobre todo, en las burbujas y en las cáscaras. Con estos estudios, Otto buscaba la ligereza en sus estructuras y llegó a la conclusión de que había que explotar las características de cada material al máximo. Por este motivo, Otto, al igual que Ricolais, componía sus estructuras a partir de dos grupos, uno a compresión y otro a tracción.

Otto construyó una gran cantidad de edificios, pero vamos a escoger el Pabellón de Alemania en Montreal en el año 1967. Este pabellón cuenta con una estructura muy similar al Queen Post de Ricolais, basándose en las leyes de la estabilidad y la tensegridad. Cuenta con un gran poste a compresión del que tiran telas a tracción.



Figura 75 – Deutscher Pavillon

Una solución con la que se podía cubrir grandes superficies a partir de estructuras muy ligeras.

 <p><i>Figura 76 – Piano y Rogers</i></p>	Piano + Rogers	
	Obra/s	Centro Georges Pompidou
	Año	1977
	Influencias	<ul style="list-style-type: none"> - Estructura como organizadora de espacios - Importancia de dónde se colocan los huecos - Espacios sirvientes y servidos

Piano y Rogers realizaron uno de los edificios más emblemáticos del siglo XX en París, el centro Georges Pompidou. Un edificio en el que la estructura lo es todo, tal y como defendía Ricolais. Una estructura que organizaba todos los espacios del centro los vacíos que se crean en la estructura son los que la gente aprovecha para utilizar el edificio, de ahí su gran importancia.

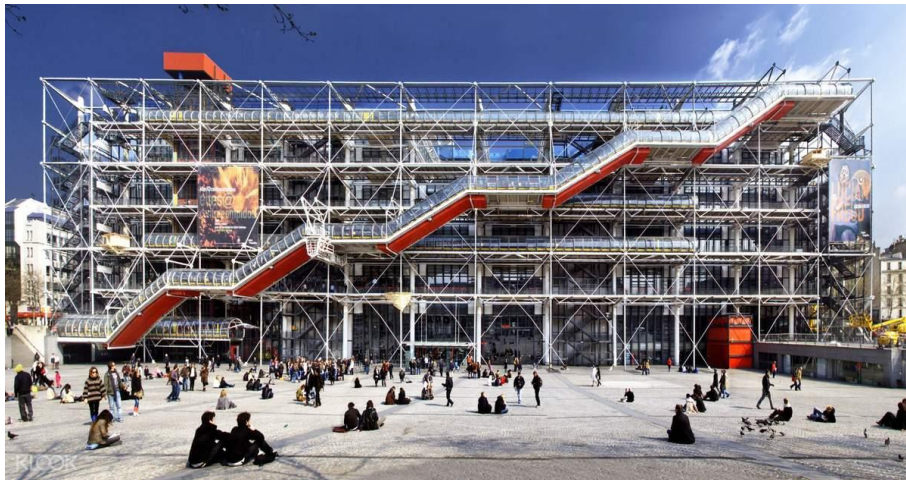


Figura 77 – Georges Pompidou Centre

Podemos decir que, gracias a este edificio, la concepción de la estructura comenzó a cambiar y esto fue en gracias, en parte, a Ricolais, ya que el apostaba por una estructura que fuera el punto más importante de la arquitectura, una arquitectura funcional en cuyos espacios se generasen actividades. Una estructura que cambia la concepción de belleza que todos tenían por entonces y rechaza la decoración para apostar por la estructura vista, que acabó siendo bella.

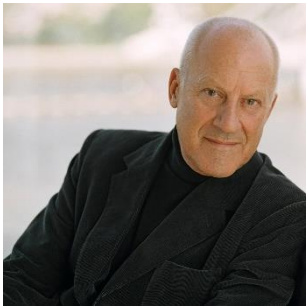
	Norman Foster	
	Obra/s	Cubierta British Museum
	Año	2000
	Influencias	<ul style="list-style-type: none"> - Ligereza, optimización - Cáscara - Esqueleto de radiolarios

Figura 78 – Foster

Norman Foster realizó en el año 2000 la nueva cubierta del patio central del British Museum en Londres. Una cubierta que buscaba la ligereza y la optimización del material. Para ello, se basó en estudios de la naturaleza como son las cáscaras y los radiolarios, algunos de ellos realizados por Ricolais.



Figura 79 – British Museum

Gracias a estos estudios consiguió una estructura ligera que pudiera cubrir todo el espacio requerido. Unas formas basadas en la matemática que consiguieron tener una belleza y una atracción muy grande y siguen siendo admiradas por cada visitante que llega al conocido museo.

Future Systems + ARUP	
Obra/s	Coexistence Tower
Año	1978
Influencias	<ul style="list-style-type: none"> - Grupo comprimido y grupo a tracción - Ligereza - Optimización del material



Figura 80 – Future Systems

En el año 1978, el estudio Future Systems propuso una nueva tipología de edificio en altura, una tipología que guardaba mucha relación con los estudios de Ricolais, ya que contaba con unos anillos internos trabajando a compresión y unos cables exteriores trabajando a tracción.

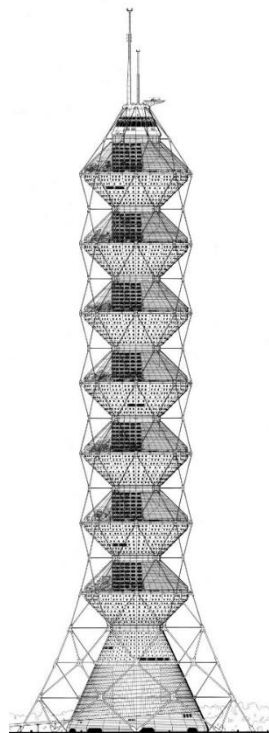



Figura 81 – Coexistence Tower

Esta propuesta recordaba mucho a maquetas experimentales que el propio Ricolais realizó para proponer nuevas formas de edificios en altura. Una propuesta que nunca se llegó a realizar, al igual que las de Ricolais.


 <p><i>Figura 82 – Simon Parsons</i></p>	PTW Architects + ARUP	
	Obra/s	Watercube, Pekín
	Año	2007
	Influencias	<ul style="list-style-type: none"> - Estructuras espaciales - Formas naturales, burbujas - Estructuras ligeras

En el año 2007, el estudio PTW Architects realizó el Watercube para los Juegos Olímpicos de Pekín 2008. Una gran edificación que albergó todos los deportes acuáticos. El estudio apostó por inspirarse en formas naturales, las burbujas, utilizando estudios sobre la estructura de las burbujas, algunos de ellos realizados por Ricolais. Además, apostaron por una estructura espacial, con lo que consiguieron una estructura ligera con gran inercia.



Figura 83 – Estructura del Watercube

Debido a la referencia de las burbujas, la estructura se complicaba mucho puesto que cada una de las piezas podía llegar a ser diferente de las demás. Para evitar esto, diseñaron diferentes módulos que se iban repitiendo y simulaban así esa irregularidad que se buscaba, una irregularidad que no se veía en la arquitectura de Ricolais.

 <p><i>Figura 84 – COX logo</i></p>	COX Architects	
	Obra/s	Helix Bridge
	Año	2010
	Influencias	<ul style="list-style-type: none"> - Grupo comprimido y grupo a tracción - Ligereza - Formas naturales

En el 2010, el estudio COX Architects realizó el puente que Ricolais nunca pudo. Un puente peatonal muy similar a maquetas experimentales que realizaba el ingeniero francés. La estructura del puente está formada por anillos internos comprimidos y barras exteriores tracciones, dejando un hueco interior en el que encontramos una pasarela peatonal.



Figura 85 – Helix Bridge

Según Ricolais, quería llegar a construir una cuerda, es decir, una estructura que funcionara al igual que una cuerda y COX lo consiguió con una estructura que recuerda a formas naturales en hélice como es el ADN.

 <p><i>Figura 86 – Toyo Ito</i></p>	Toyo Ito	
	Obra/s	Mediateca de Sendai
	Año	2001
	Influencias	<ul style="list-style-type: none"> - Cuerdas dentro de una cuerda - Ligereza - Estructura como elemento principal del edificio

A principios del siglo XXI, Toyo Ito diseñó un edificio con una estructura muy peculiar. Una estructura que se basaba en 13 pilares de grandes dimensiones, que a su vez estaban formados por pilares más pequeños.

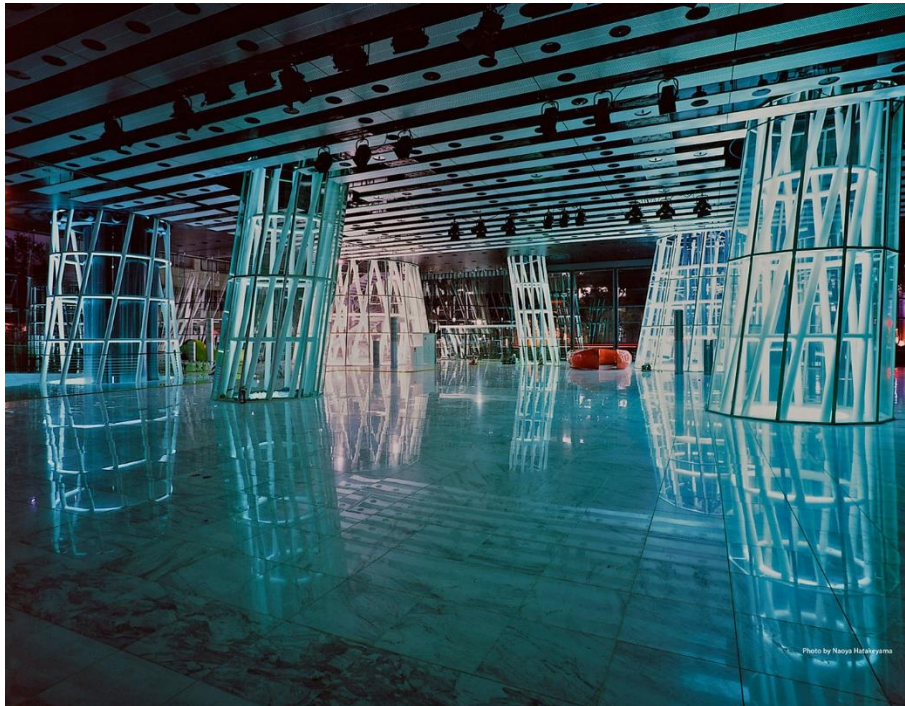


Figura 87 – Mediateca de Sendai

Unos pilares que recuerdan a los diseños de Ricolais de las cuerdas y utilizan el mismo funcionamiento, puesto que cuentan con una gran inercia al estar separados, pero con una masa muy ligera al ser pequeños pilares. Es una forma de agrupar los pilares de toda la planta por grupos, dejando el resto de la planta completamente libre para el uso de los usuarios. Según Ricolais, la importancia reside en los huecos que deja la arquitectura, ya que ahí es donde se realizan las actividades. Este es un claro ejemplo de ello.

05.2_ Aplicaciones innovadoras

Pero Ricolais no ha tenido sólo influencia en grandes arquitectos e ingenieros, sino que sus estudios han hecho posible que, gracias a nuevas tecnologías como la impresión 3D, hayan podido influir de forma positiva en otras disciplinas.

Podemos decir que la impresión 3D ha sido la revolución en la última década a la hora de fabricar objetos de pequeño tamaño, ya que no permite realizar de forma rápida y con un alto nivel de precisión cualquier objeto que diseñemos. En los últimos años su evolución ha hecho que la escala se vaya aumentando, a la vez que sus diferentes usos.

La libertad de formas que nos permite la impresión 3D, ha hecho que conceptos que Ricolais utilizaba en sus diseños vuelvan a ver la luz y recobren importancia. El más destacado es el hecho de colocar masa únicamente por dónde se van a transmitir las cargas, un concepto que Ricolais utilizaba a menudo, pero por su complejidad constructiva no se llegó a desarrollar de forma satisfactoria. Gracias a las nuevas tecnologías que tenemos en la actualidad se le puede dar uso a los estudios de Ricolais fuera de la arquitectura y la ingeniería convencional.

A continuación, vamos a ver tres ejemplos claros y cercanos en los que se combinan las nuevas tecnologías con los conceptos que Ricolais tanto utilizaba en sus estudios. Estos ejemplos cuentan con escalas y disciplinas distintas, lo que hace que los estudios topológicos de Ricolais cobren una mayor importancia, ya que esa ausencia de forma y escala ha hecho que se puedan dar diferentes formas de uso o tipologías a una misma idea o concepto.

05.2.1_ Puente IACC

De los tres casos, este es el más cercano a la arquitectura y la ingeniería, puesto que es un puente. Pero este puente es el primero que se imprime en 3D por completo y no es un puente convencional, sino que para el diseño del mismo se han analizado las futuras cargas que iba a soportar y se ha colocado masa únicamente por donde iban a transmitirse éstas, siguiendo los estudios de Ricolais, como antes hemos mencionado.

El puente se ubica en el parque Castilla-La Mancha de la ciudad de Alcobendas, en la Comunidad de Madrid y sirve para cruzar uno de los arroyos que hay en el parque. Todo el puente es estructura y cuenta con una longitud de 12 metros y una anchura de 1'75 metros. Fue construido en el año 2016 y la empresa Acciona llevó a cabo su construcción y puesta en obra junto con el Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña (IAAC).



Figura 88 - Puente

El diseño se llevó a cabo sobre la base de las técnicas de arquitectura orgánica y biomimética, buscando que su apariencia sea lo más natural posible, logrando así un ahorro de material y de energía, tal y como Ricolais defendía.

El cálculo y análisis estructural por medio de ordenadores permitió que la estructura fuera lo más óptima posible, colocando únicamente el material que se necesitaba para su función. Aquí podemos ver como fue el desarrollo del diseño.

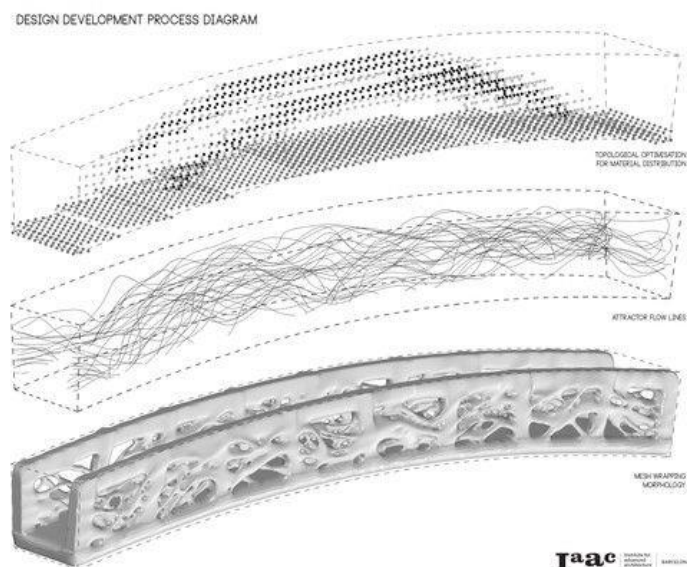


Figura 89 – Diagramas estructurales

Este fue el primer paso para la construcción de elementos optimizados de uso público gracias a la impresión 3D. Esperemos que este sólo sea el principio de un futuro en el que la optimización del material sea una de las premisas más importantes en la obra pública.

05.2.2_ Muebles

En este caso, la relación con la arquitectura está en el diseño, ya que muchos arquitectos suelen dedicarse también al diseño de muebles, debido a la estrecha relación entre las dos disciplinas.

Al igual que con el puente, ahora nos encontramos con objetos impresos en 3D después de haber realizado un cálculo y análisis estructural con tal de optimizar la pieza y reducir el gasto de material. Poco a poco vamos viendo que la impresión 3D se introduce en el mundo del diseño de muebles, debido a que cada pieza puede ser única y eso es un factor muy importante.

Predominan el diseño de nudos en mesas o sillas, unos nudos que recuerdan a los huesos por sus formas internas irregulares. Es inevitable no acordarse de los estudios de la estructura interna de los huesos que realiza Ricolais, una estructura que busca la optimización y la ligereza.

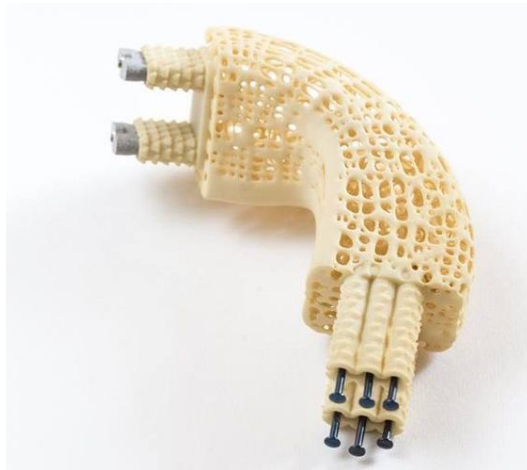


Figura 90 – Nudo 3D mueble

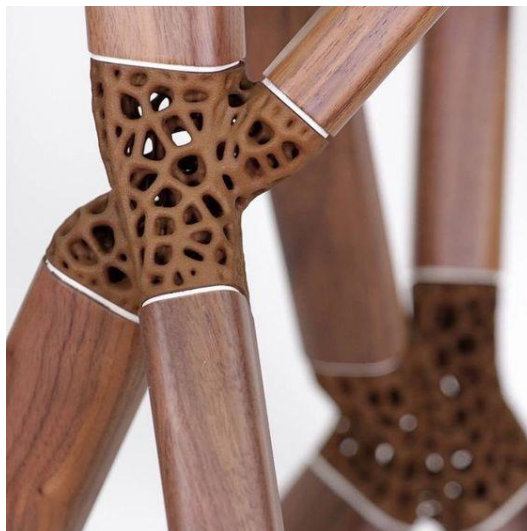


Figura 91 – Nudo 3D mueble

Aunque en menor cantidad, también empezamos a ver pies de mesa completamente impresos en 3D con las mismas características que los nudos anteriores, buscando la optimización estructural y la belleza en unas estructuras que recuerdan a la estructura interna de los huesos. Esto significa que, conforme va avanzando la tecnología, podemos aumentar la escala de las impresiones. Una evolución que es constante y cuyos límites son desconocidos.



Figura 92 – Soporte 3D mesa

En la actualidad ya tenemos nudos y soportes de muebles, quien puede negar que en unos años no nos podamos encontrar pilares o vigas con estas características en arquitecturas innovadoras. La unión de nuevas tecnologías y conocimientos de siglos anteriores pueden dar un futuro de innovación y cambio.

05.2.3_ Férulas

Este último caso, es el más alejado de la arquitectura, puesto que está relacionado con la medicina. Y es que hay conceptos de la arquitectura que los podemos trasladar a casi cualquier disciplina profesional. Este es un claro ejemplo de ello.

Gracias a un escáner 3D y una impresora 3D, se pueden realizar férulas impresas que son más cómodas y ligeras que las escayolas convencionales e inmovilizan igual de bien. En España, ya existen varias empresas que se dedican a esto, realizar férulas para inmovilizar diferentes partes del cuerpo de sus pacientes.

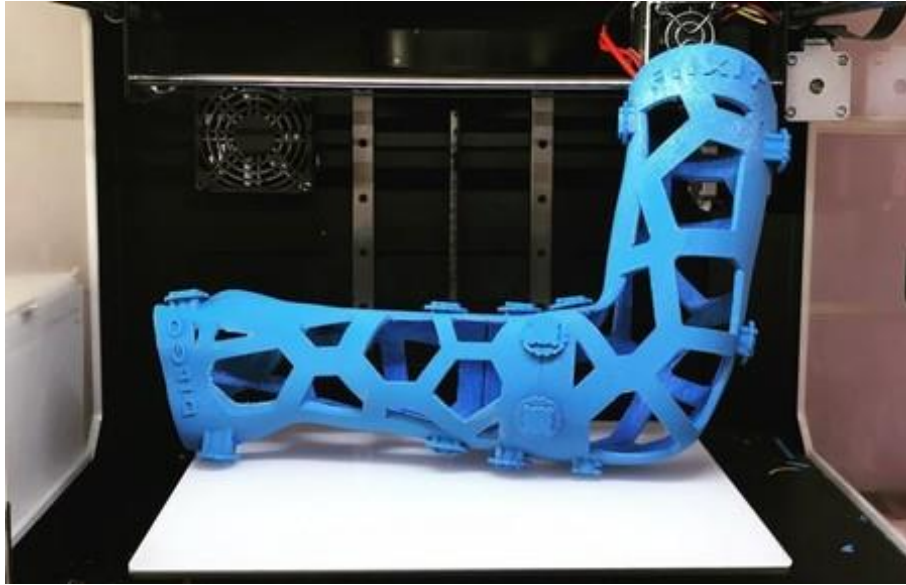


Figura 93 – Férula brazo

A cada paciente se le trata de forma individualizada y se le hace una férula personalizada tras un escaneo previo de la zona afectada. El proceso de diseño sigue los conceptos vistos de Ricolais, colocando masa únicamente donde se necesite, dependiendo de la persona y de la lesión que se tenga. Este diseño optimizado permite que se ahorre material y que la férula se adapte a las necesidades de cada paciente.

Aquí podemos ver diferentes casos de férulas personalizadas:



Figura 94 – Férula mano



Figura 95 – Férula brazo

Estos son 3 ejemplos, pero seguro que existen muchos más en los que las nuevas tecnologías se pueden combinar con antiguos conocimientos para mejorar la calidad de vida de las personas. Gracias a estos ejemplos podemos verificar que el estudio topológico de Ricolais permitía diferentes aproximaciones de un mismo estudio, aumentando las posibilidades de uso en diferentes disciplinas fuera de la arquitectura y la ingeniería.

06_PROPUESTA SISTEMA TETRAGRID

06.1_Introducción

La topología estructural elegida para desarrollar y realizar un estudio más extenso y una propuesta es el Sistema **TETRAGRID**, esta elección se debe a que fue el único sistema que Ricolais llegó a desarrollar como arquitecto y, gracias a ello, es el sistema en el que más tiempo dedicó para desarrollar diferentes tipologías con tal de comprobar cuál era la más conveniente en cada caso.

Dicha construcción que realizó con el Sistema Tetragrid fue un mercado construido en un pueblo de Camerún, con las tecnologías y los materiales de la zona. Para ello, Ricolais realizó un sistema de nudos y barras al que denominó Aplex y con el que consiguió realizar una obra ligera, económica y fácil de construir.

A continuación, vamos a ver más en detalle como fue el proceso de ideación del sistema Tetragrid que originó el Sistema **APLEX**.



Figura 96 – Reflejo nudo

06.2_Evolución

Como hemos visto en capítulos anteriores, Ricolais destacó en el mundo de las estructuras por experimentar con topologías estructurales en forma de maquetas, en vez de tipologías definidas como hacían el resto de arquitectos e ingenieros de mitad del siglo XX. Unas topologías que eran estructuras in-acabadas que carecían de escala y que no eran exactamente nada, pero tendían a algo y podrían llegar a formar tipologías diferentes.

Esta ausencia de escala le hacía trabajar con la tranquilidad de no tener que pensar en materiales o dimensiones, sino que simplemente tuviera que experimentar, acertar o fracasar, aprender de la maqueta, mejorarla con lo aprendido, volver a experimentar... Y así hasta encontrar el sistema estructural adecuado para cada caso. Una forma de mejora y aprendizaje basada en el fracaso y que gracias a ella consiguió muchas mejoras y avances en el campo de las estructuras.

El Sistema Tetragrid no fue una excepción, como todos los sistemas topológicos de Ricolais sufrió una serie de cambios y mejoras para adaptarse a las diferentes necesidades y consigue pasar de las maquetas experimentales hasta la realidad de la obra en Camerún. Dicha evolución la podemos explicar en 3 fases:

06.2.1_ Topología estructural

Como sucedía en muchas de las topologías de Ricolais, el Sistema Tetragrid nació de la búsqueda del “peso cero y luz infinita” que tanto le obsesionaba. El sistema nació tras años de estudio que terminaron en una conclusión que tuvo mucha controversia, ya que se oponía a los estudios de Buckminster Fuller, uno de los mejores arquitectos en cuanto a estructura se trataba del momento.

La conclusión a la cual llegó Ricolais fue que para construir una estructura ligera se debían utilizar elementos grandes y pesados, una paradoja más dentro de los estudios de Ricolais. Él se apoyaba en que los nudos pesaban más que las barras, por tanto, a mayor número de nudos, mayor peso de la estructura. Además, a mayor número de nudos, mayor número también de barras y mayor complejidad de ejecución. Pero al reducir el número de nudos y barras y conservar la misma luz a cubrir, los elementos debían ser más resistentes y pesados. Debido a esto, el estudio topológico se basó en reducir al máximo el número de nudos, lo que conllevaba una reducción en el número de barras y de peso.

Una primera aproximación experimental llevó a un sistema en el que se eliminan todas las juntas y se transforman en un simple anillo en cada uno de los vértices de los elementos conectados, lo que le permitía utilizar elementos continuos, superpuestos, para cada una de las redes. El sistema carecía de abrazaderas, la fricción era suficiente para garantizar la estabilidad.

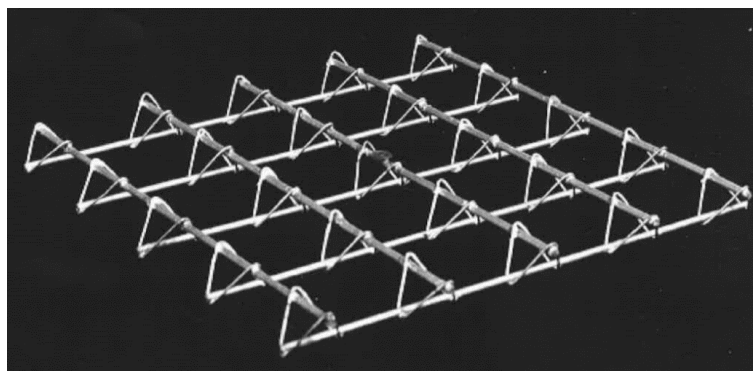


Figura 97 - Maqueta

Para tener una experiencia propia de cómo sería el sistema, he realizado una pequeña maqueta experimental en la que se tuvieron en cuenta los planteamientos que tuvo Ricolais. Una maqueta en la que encontramos dos grupos de elementos, uno trabajando a tracción y otro a compresión y en la que la estabilidad se consigue gracias a aplicar una fuerza de tracción. Encontramos restricciones por parte de los elementos comprimidos en dos direcciones que permiten la estabilidad del conjunto.

El grupo de compresión está formado por piezas de impresión 3D y el grupo de tracción por hilo de pescar. La tensión para estabilizar el sistema se ejerce manualmente, tensando el hilo para que todas las piezas entren en tensión y trabajen.

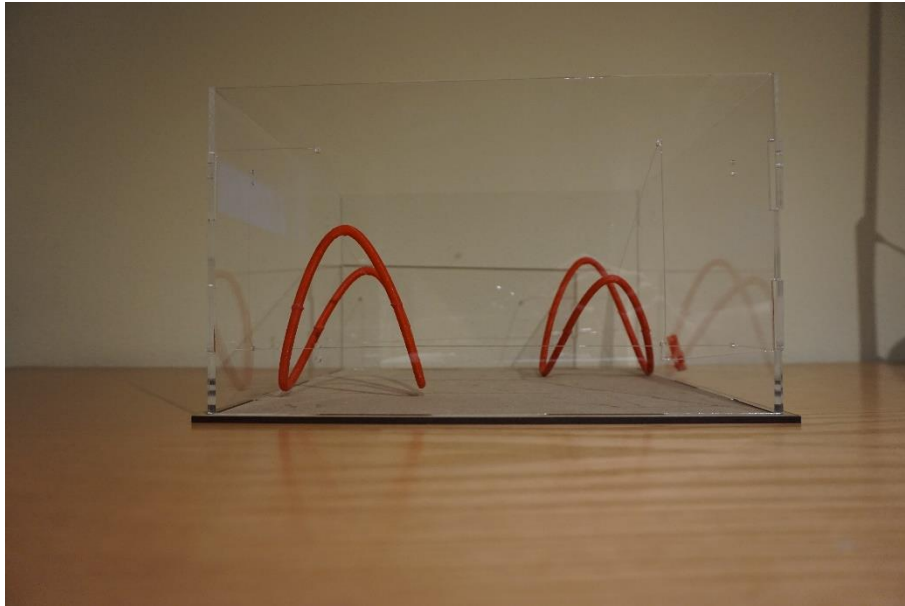


Figura 98 – Sistema en reposo

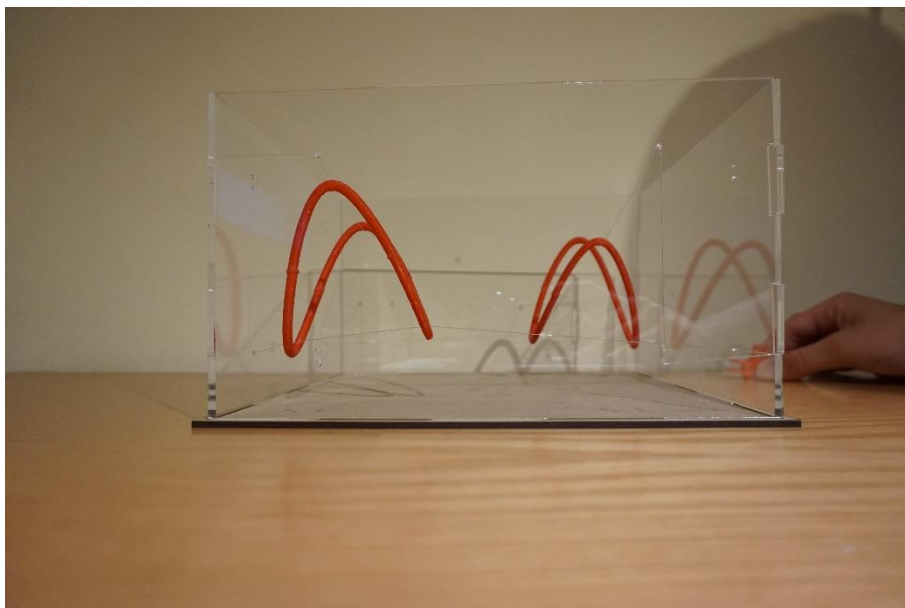


Figura 99 – Sistema en tracción

**Resto de imágenes de la Maqueta 1 en el apartado 09_Anexos.*

Tras esta primera aproximación, Ricolais era consciente de la dificultad que tenía realizar este sistema estructural en el que no encontrábamos ningún nudo como tal y se solucionaban gracias a una gran fricción entre diferentes elementos. Por ello, siguió desarrollando nuevas aproximaciones a partir de la primera, ahora ya sí, con la aparición de nudos. La aparición de los nudos hizo que aparecieran un nuevo tipo de barras en diagonal que conectaban ambos cordones de la estructura y permitían una gran resistencia y ligereza, puesto que eran estructuras de gran canto con muy poca masa. Por tanto, ahora nos encontramos con un sistema de nudos articulados formado por barras horizontales distribuidas en dos cordones, uno superior y uno inferior, unidos entre sí mediante barras en diagonal.

Esta primera topología estructural da pie a una modulación en forma de tetraedro que constituyó el sistema estructural o tipología estructural **TETRAGRID**.

06.2.2_ Tipología estructural

Una vez Ricolais ya comprobó que el sistema podía funcionar, llegó el momento de poner a prueba el sistema y ver qué posibilidades tenía. Gracias a que los nudos eran articulados, el sistema podía tener muchas formas posibles, dependiendo del tamaño de las barras. Dichas formas fueron experimentadas por él mediante diferentes maquetas a las que llevaba al límite con tal de probar si el sistema era óptimo en todas y cada una de ellas.



Figura 100 – Maqueta sistema Tetragrid – Cubierta plana



Figura 101 – Maqueta sistema Tetragrid – Cubierta curva a dos aguas

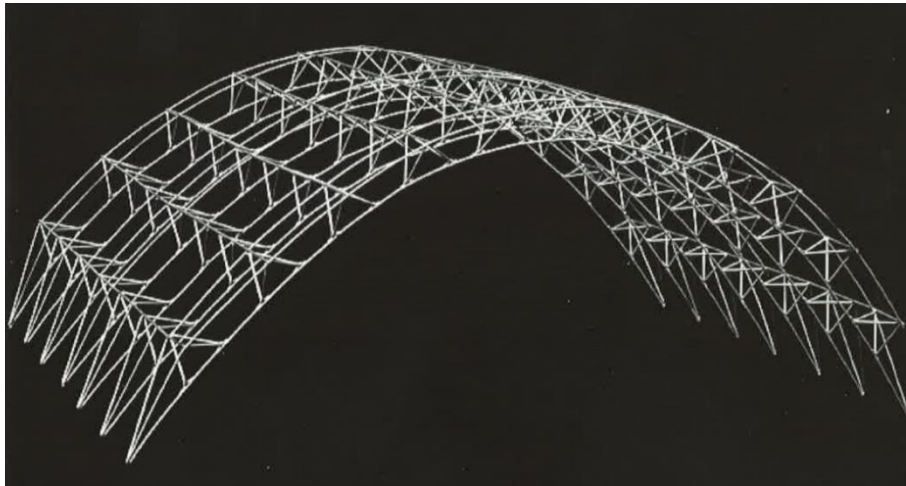


Figura 102 – Maqueta sistema Tetragrid

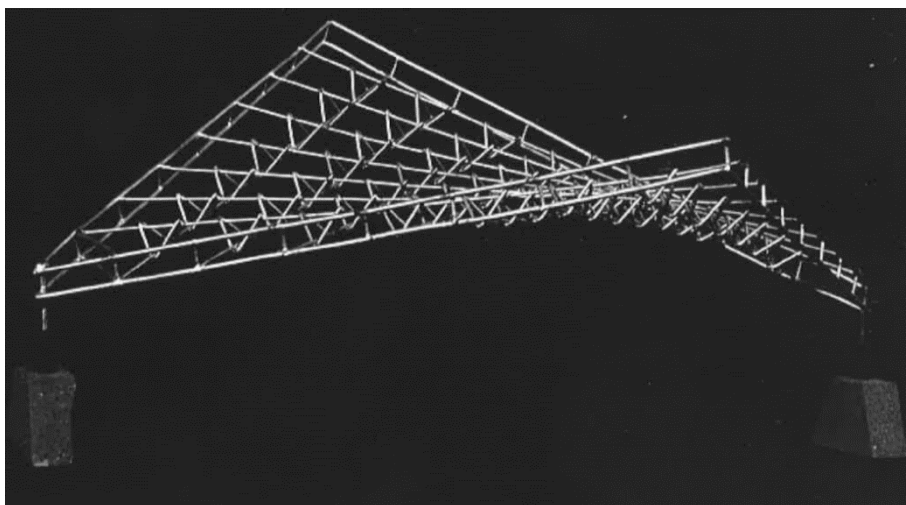


Figura 103 - Maqueta sistema Tetragrid

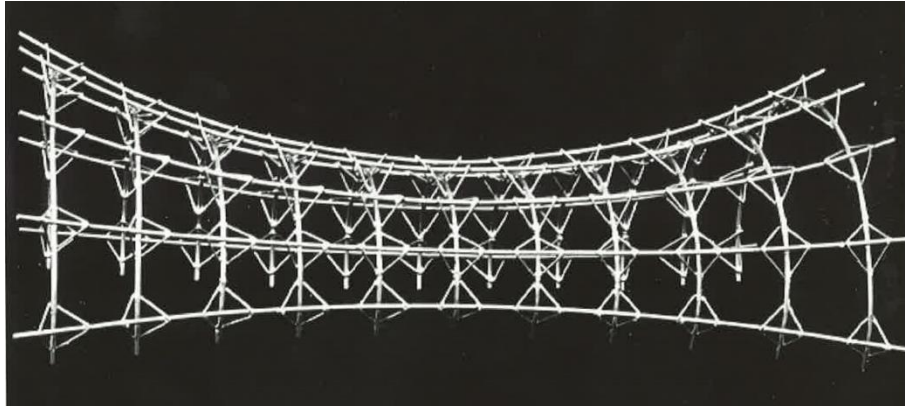


Figura 104 - Maqueta sistema Tetragrid

Ricolais consiguió transformar una topología estructural sin nudos que era muy difícil de ejecutar en diferentes tipos de cubiertas de diferentes geometrías que se podían llegar a adaptar a diferentes programas como hangares, pabellones, estadios...

06.2.3_ Puesta en obra

Pero la oportunidad que tuvo Ricolais no fue la de hacer grandes hangares para el ejército o un estadio, sino que fue la de una cubierta para un mercado en Camerún a mediados del siglo XX, con los materiales y técnicas del momento.

Fue en ese momento cuando Ricolais comenzó a preocuparse por la escala y por el material, algo que sólo hacía una vez ya sabía el programa y la ubicación del proyecto. Para ello, comenzó a diseñar el punto más importante de la estructura, el nudo.

Unos nudos que acabarían formándose por una serie de perfiles metálicos que se atornillaban a las barras de madera que formaban la estructura del mercado. Unos nudos articulados a los que llegaban 8 barras. El diseño de los nudos era muy importante para Ricolais, puesto que con un único nudo quería solucionar todos los nudos que iba a tener la estructura. Su idea principal era la de simplificar la estructura al máximo para que fuera económica, ligera y fácil de construir.

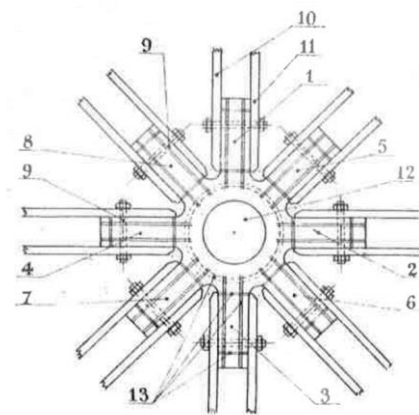


Figura 105 – Dibujo del nudo

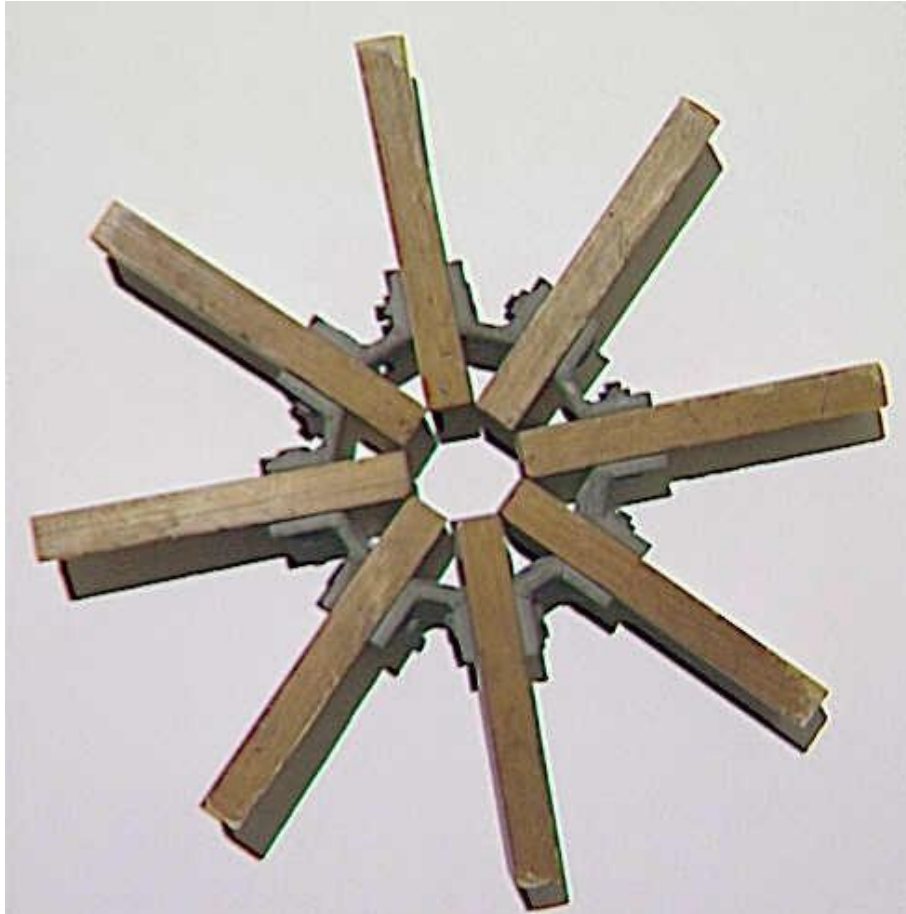


Figura 106 – Prototipo del nudo

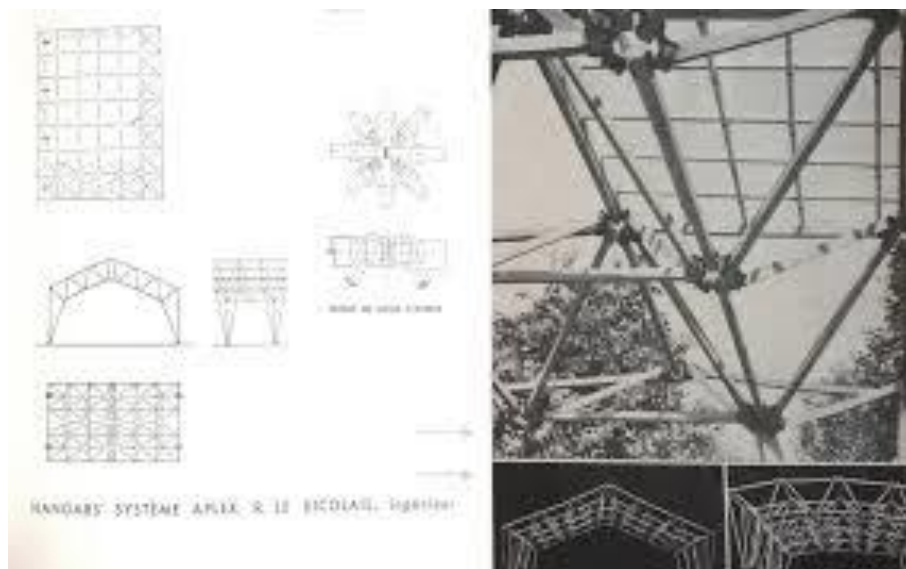


Figura 107 – Dossier informativo del Hangar Apex

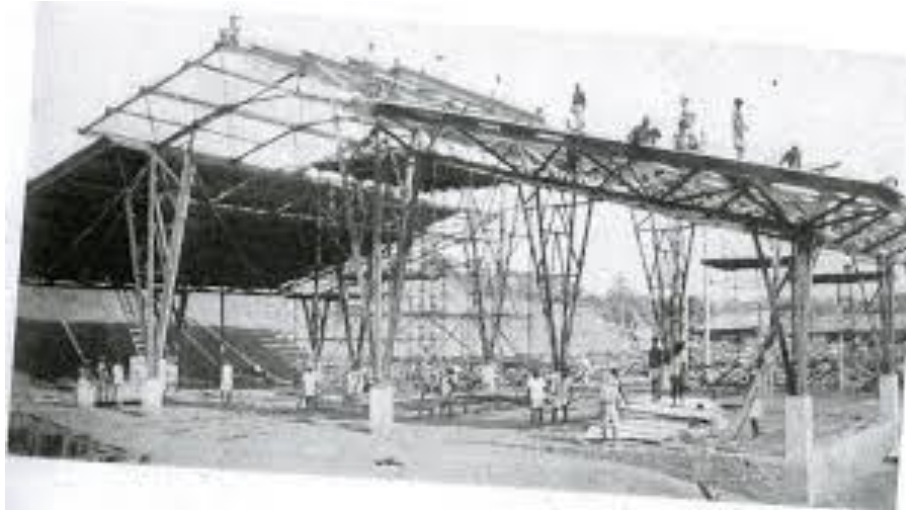


Figura 108 – Imagen del mercado de Camerún en construcción

Para experimentar en primera persona el trabajo y el proceso de ideación de Ricolais, he realizado una maqueta con la que he podido conocer a fondo el sistema Tetragrid y en la que he diseñado una serie de nudos, todos a partir de una misma forma y los cuales he conseguido hacer gracias a nuevas tecnologías como es la impresión 3D para verificar que las nuevas tecnologías son totalmente compatibles con la arquitectura de Ricolais.

La aparición de nuevo tipos de nudos se hizo para experimentar cómo las diferentes posibilidades que daba el nudo original de Ricolais según la ubicación del nudo dentro de la estructura.

La maqueta está resuelta por 4 longitudes de barras de la misma tipología y 5 tipos de nudos que se adaptaban dependiendo de la zona en la que se encontraban, pero todos partían originalmente del mismo.



Figura 109 – Alzado Maqueta 2

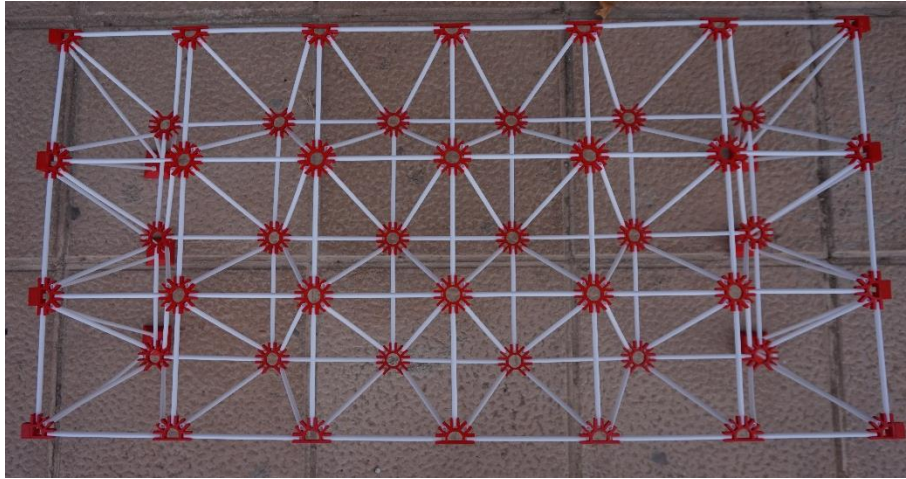


Figura 110 – Cubierta Maqueta 2

**Resto de las imágenes de la Maqueta 2 en el apartado 09_Anexos.*

06.3_ Propuesta Vivienda unifamiliar

Una vez ya conocemos el proceso de evolución que realizó Ricolais para pasar de una maqueta en la que no le importaba la materialidad ni la escala a una obra real en condiciones no muy favorables y haber experimentado de primera mano, por medio de maquetas, dicho proceso, llega el momento de proponer.

Para mi propuesta, he querido cambiar el ámbito de uso y utilizar de otra forma la estructura diseñada por Ricolais. Una estructura que siempre se relacionaba con una cubierta que cubría grandes luces y que contaba con una tridimensionalidad muy peculiar tanto en las barras de la cubierta como en las de las patas que llegaban hasta la cimentación. Por este motivo, he querido proponer una vivienda unifamiliar, una vivienda que aprovecha las tres dimensiones de la estructura para albergar todo lo necesario para que la vivienda sea completamente flexible, adaptándose a las necesidades de la sociedad actual. Una flexibilidad que va acompañada de ligereza, economía, prefabricación y modulación, siguiendo con la forma de trabajar de Ricolais en esta topología estructural.

Para la propuesta nos hemos ubicado en una parcela de 450 m² (30x15 m) en una urbanización a las afueras de la ciudad de Elche. La vivienda está formada por una única planta de 130 m² (14x9 m) de los cuales 110 m² son habitables, integrándose en el contexto y respetando las leyes urbanísticas.

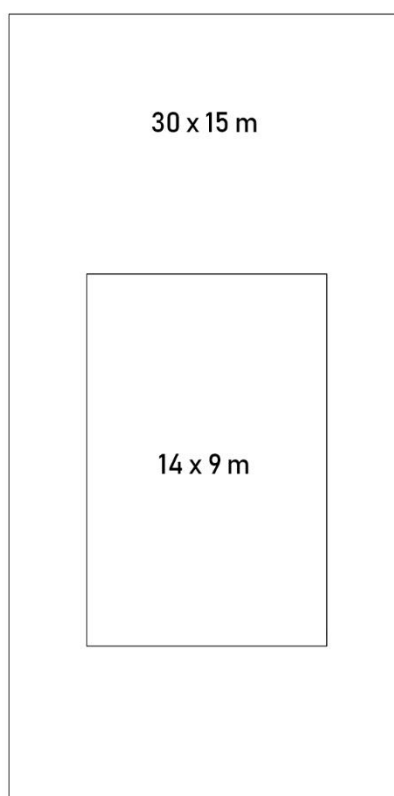


Figura 111 – Esquema de la parcela a edificar

Como podemos observar, la vivienda se encuentra retranqueada de todos los lindes de la parcela, dejando espacio para el acceso de coches en la parte inferior y espacio para jardín o piscina en la parte superior.

La idea principal de la propuesta es conseguir diseñar una tipología de vivienda unifamiliar que sea fácil de construir, económica, ligera y que se pueda construir en cualquier parte del mundo sin que requiera de una gran tecnología o conocimientos. Por este motivo, propongo utilizar un material que encontramos en cualquier parte del mundo que es la madera, con uniones en seco y mucho trabajo de prefabricación que agiliza y simplifica el montaje.

06.3.1_ Maqueta

Para entender en profundidad cómo sería la estructura de la vivienda, hemos realizado una maqueta a escala 1:125 de la estructura. La primera decisión que se tomó fue realizarla en madera, al igual que la futura vivienda y la segunda decisión fue realizarla en corte láser, simulando la producción personalizada y en cadena que se sigue en la industria de la madera. Por último, decidimos realizar todos los nudos mediante uniones en seco, utilizando el sistema machihembrado.

La maqueta se soluciona a partir de 4 tipos de barras y 8 tipos de nudos que, al igual que en la maqueta anterior, parten todos del mismo original, excepto el de cimentación y los encuentros entre la cubierta y las patas. Una solución que se puede realizar de forma industrial con rapidez.

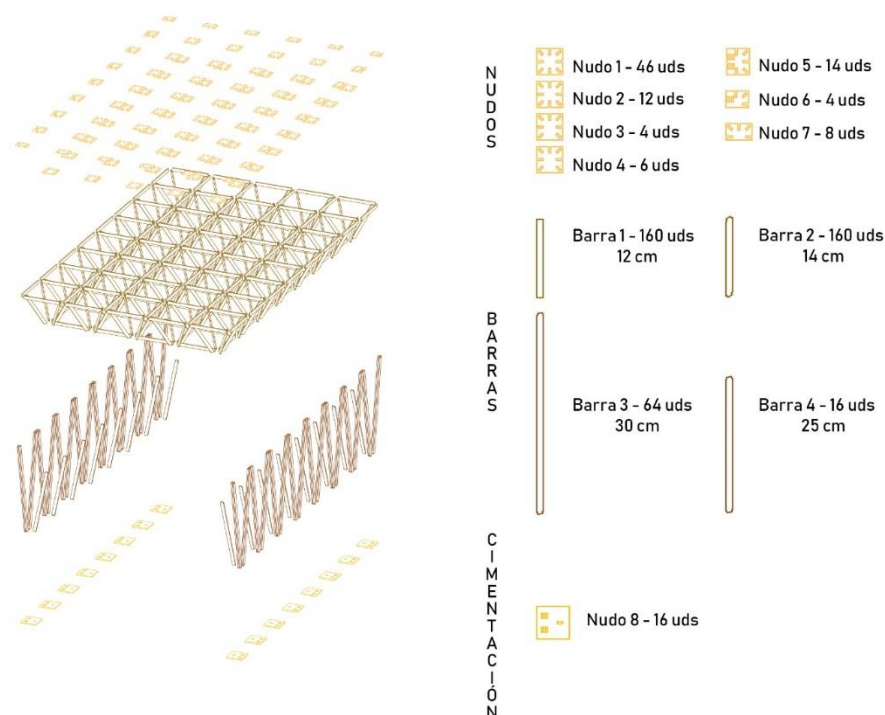


Figura 112 – Elementos que componen la maqueta



Figura 113 – Alzado Maqueta 3

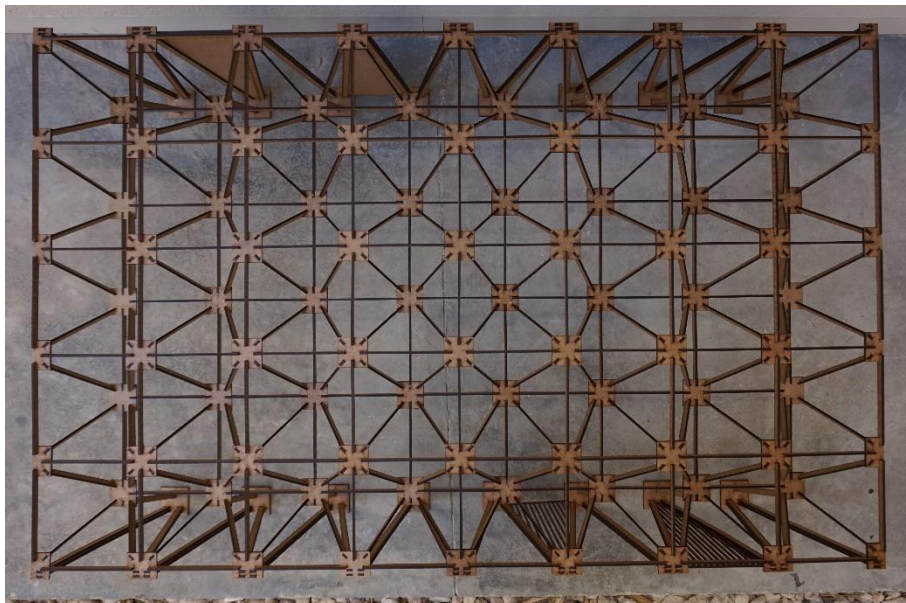


Figura 114 – Cubierta Maqueta 3

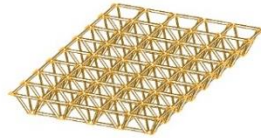
06.3.2_ Diagramas explicativos

Una vez ya está pensada y ejecutada la estructura, hay que darle vida a la vivienda, tener en cuenta todos los aspectos que la forman y hacer que todos ellos trabajen conjuntamente para que el diseño tenga sentido y trabaje como una unidad. Para ello, he realizado una serie de diagramas que resumen los aspectos más importantes que tiene la vivienda:



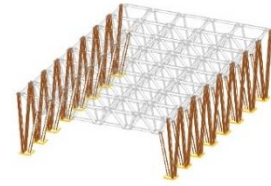
- Modulación -

Tetraedro que modula la estructura y los espacios de la vivienda



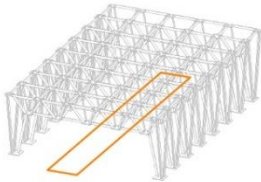
- Extensión -

Repetición del módulo hasta formar una malla de 5x8



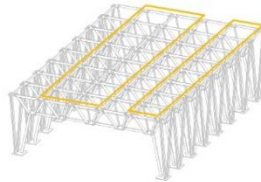
- Elevación -

Aparición de patas en el eje longitudinal



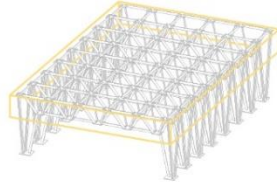
- Linealidad -

El programa de la vivienda se desarrolla a lo largo del eje longitudinal



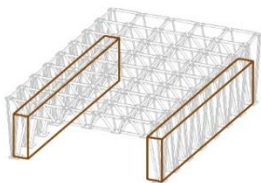
- Luz cenital -

Importancia de la luz cenital en las zonas centrales y habitables de la vivienda



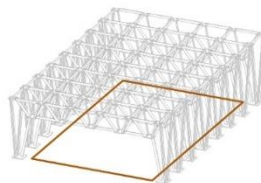
- Luz por fachada -

Existencia de ventanas y de entradas de luz gracias a la tridimensionalidad de la estructura



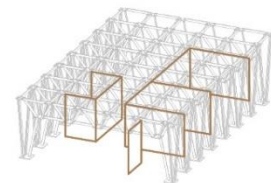
- Mobiliario -

El mobiliario se encuentra integrado en la estructura, al igual que las instalaciones



- Planta libre -

Gracias a la integración del mobiliario e instalaciones nos encontramos con un espacio interior diáfano



- Flexibilidad -

Existencia de particiones móviles que permiten configurar el espacio de forma libre

Figura 115 – Diagramas vivienda unifamiliar

06.3.3_ Combinaciones

Esa flexibilidad que se explica en el último aspecto es la parte más importante en el programa de la vivienda y se consigue gracias a particiones móviles que se desplazan por raíles ubicados en el cordón inferior de la vivienda y que se almacenan en el espacio hueco que forman las fachada gracias a su tridimensionalidad. Sucede lo mismo con el mobiliario, lo más importante es conseguir un buen diseño del mobiliario para que todo esté integrado y la vivienda funcione tal y como queremos. Las únicas partes fijas de la vivienda serían los espacios húmedos, es decir, la cocina y el aseo.

Para explicar la flexibilidad que se quiere conseguir dentro de la vivienda, hemos supuesto 9 posibles distribuciones interiores, según las necesidades de los usuarios. 9 combinaciones que se consiguen gracias a las particiones móviles y la integración del mobiliario.

- Combinación 1:

En la primera combinación, encontramos una vivienda convencional con dos habitaciones, de las cuales una es doble y la otra individual, un baño, salón y cocina. En esta vivienda podría vivir una familia o una pareja que tendría una habitación de invitados.

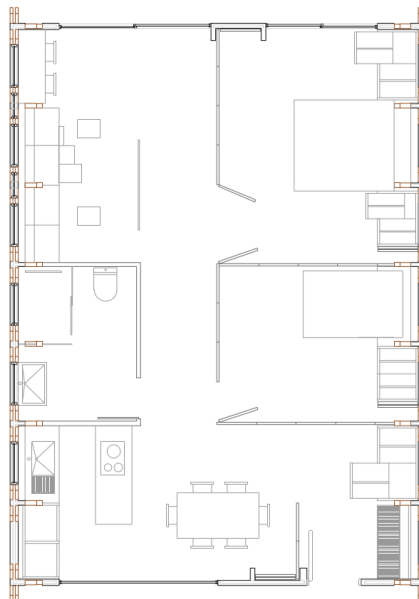


Figura 116 – Planta Combinación 1

- Combinación 2:

En esta combinación, sustituimos la habitación individual de la 1 por un estudio o despacho. Esta vivienda estaría pensada para una persona o una pareja en la que alguno de los dos o ambos trabajen en la vivienda.

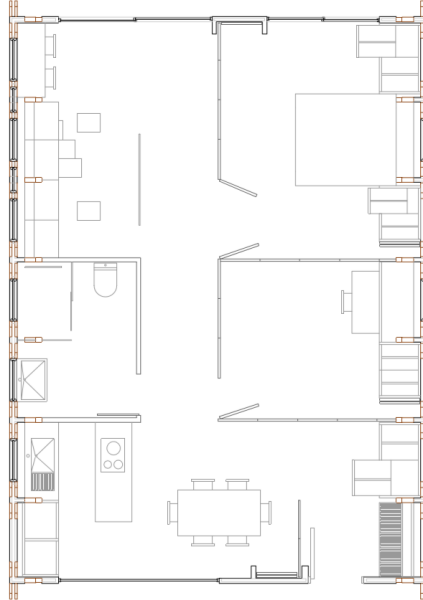


Figura 117 – Planta Combinación 2

- Combinación 3:

Esta vivienda parte de la 2 pero elimina el salón para crear una gran habitación doble, buscando una mayor tranquilidad y privacidad del usuario. El despacho se mantendría, creando una zona de trabajo.

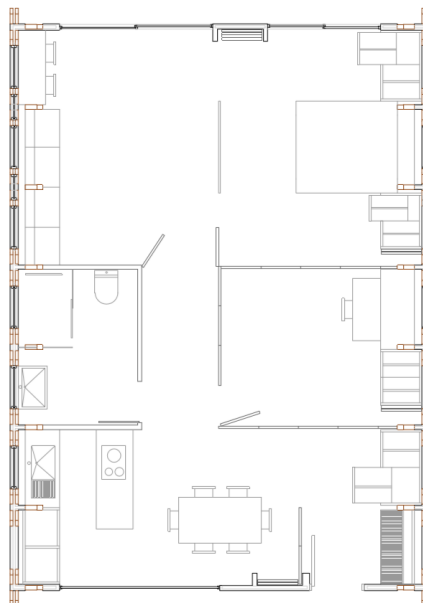


Figura 118 – Planta Combinación 3

- Combinación 4:

Esta vivienda está pensada para realizar más eventos e invitar a gente, eliminando la zona de despacho y dando paso a un amplio comedor en el acceso de la vivienda, contando a su vez con acceso al salón. La única zona privada de la vivienda sería la habitación doble.

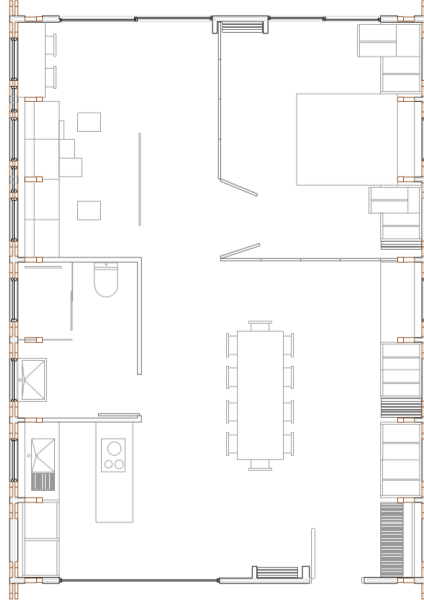


Figura 119 – Planta Combinación 4

- Combinación 5:

En este caso, todas las habitaciones de la vivienda se recogen y dan paso a un gran comedor diáfano en el que se conecta la cocina con el salón, dejando espacio para eventos y celebraciones. Esta distribución se utilizaría en eventos especiales y temporales, una vez recogidas las mesas, la vivienda volvería a la normalidad con sus espacios habitables.

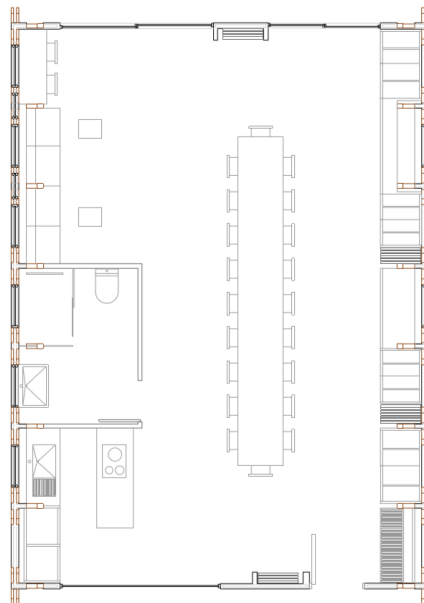


Figura 120 – Planta Combinación 5

- Combinación 6:

Este caso es muy similar al 4 con la excepción que la zona de comedor se ubica junto al salón y no junto a la cocina, eliminando la habitación doble y manteniendo la habitación individual. En este caso se mejora la conexión de los invitados con el exterior de la parcela, creando una relación directa gracias a las grandes ventanas correderas que hay en la fachada trasera.

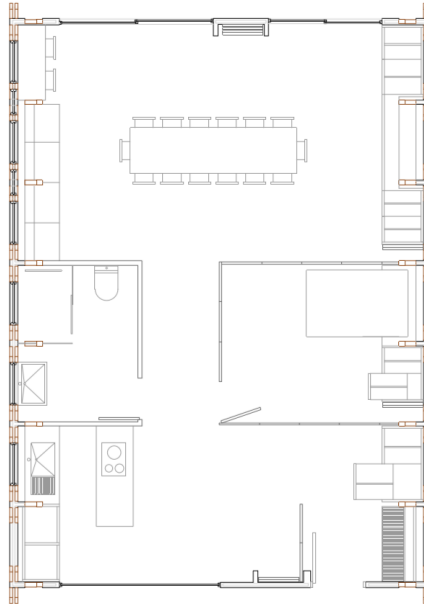


Figura 121 – Planta Combinación 6

- Combinación 7:

En este caso, la vivienda se transforma en un despacho profesional en la que conservamos una zona de cocina en la que los trabajadores pueden cocinarse su propia comida. Las particiones móviles permiten separar la zona de trabajo de la zona de reuniones, aumento la privacidad y la concentración en ambas zonas. Este caso podría ser útil para cualquier empresa que tenga cerca de 10 trabajadores.

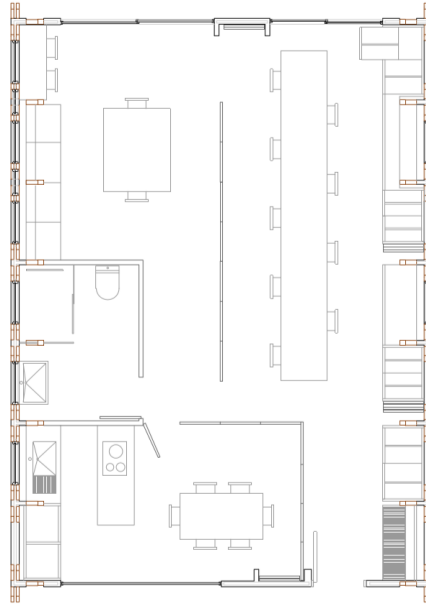


Figura 122 – Planta Combinación 7

- Combinación 8:

Este caso es un punto medio entre despacho profesional y vivienda, en él encontramos una zona de trabajo y otra de reuniones que da al exterior. Respecto a la vivienda, se mantendría la habitación doble y la zona de cocina tanto para uso de la vivienda como de los propios trabajadores. Este caso podría ser útil para una pequeña empresa que tenga alrededor de 6 trabajadores y cuyo jefe sea el dueño de la vivienda.

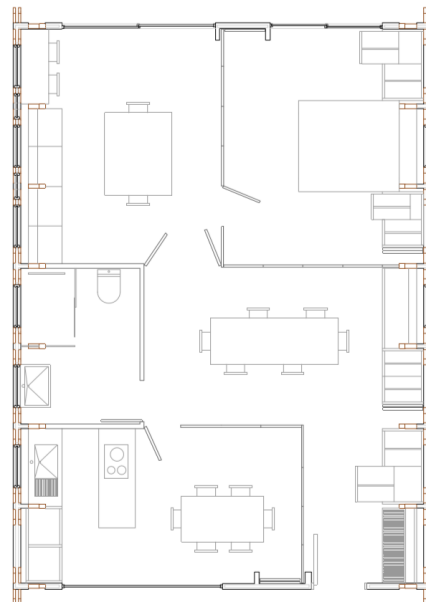


Figura 123 – Planta combinación 8

- Combinación 9:

Este último caso sería muy parecido al 2 pero con una diferencia clara. La zona de trabajo o despacho tendría acceso tanto acceso directo a la calle como acceso al resto de la vivienda, permitiendo que dentro de la parcela se combine el uso residencial y el uso de oficina de forma simultánea sin llegar a compartir ningún espacio más que la entrada de la vivienda.

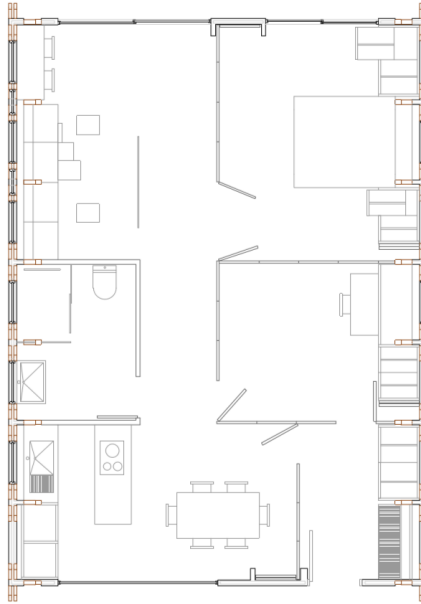


Figura 124 – Planta Combinación 9

06.3.4_ Mobiliario

Una vez ya tenemos algunas de las posibles combinaciones, hay que adentrarse en el diseño del mobiliario, ya que he querido seguir la forma de trabajo de Ricolais e ir de lo más general a lo más específico. Para ello, he querido diseñar en 3 dimensiones cómo sería el mobiliario necesario dentro de la vivienda para satisfacer a todas las posibles necesidades. Un mobiliario que, como ya hemos mencionado antes, se encontrará integrado en la estructura de las fachadas, dejando todo el resto de planta completamente libre.

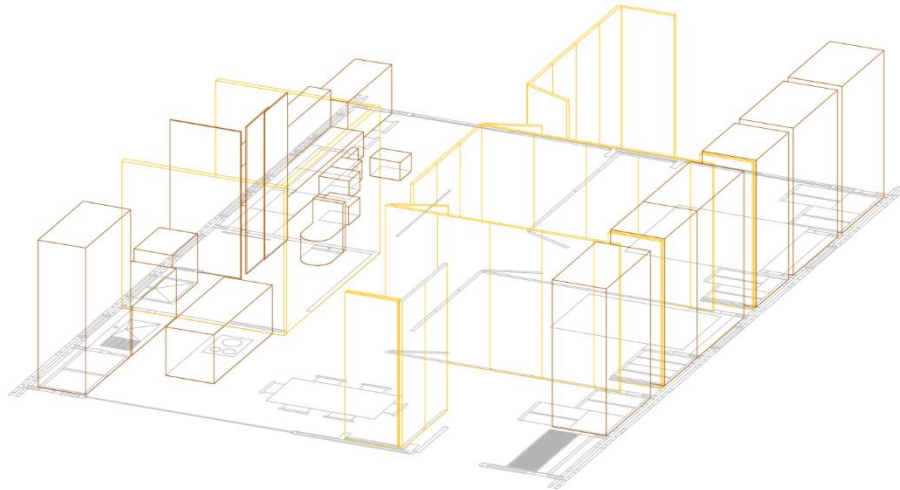


Figura 125 – Mobiliario vivienda

- Cocina

La cocina, junto con el baño, serán las únicas estancias que no sufrirán cambios en las diferentes combinaciones. Una cocina en la que todo el mobiliario que necesita instalación de agua se encontrará integrado en la fachada y contará con una isla en la que se ubicará el extractor.

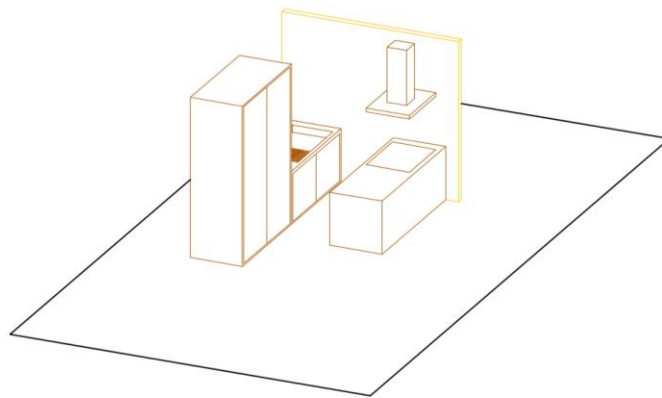


Figura 126 – Mobiliario cocina

- Entrada

En la entrada a la vivienda u oficina, encontramos un recibidor con banco y perchero donde poder dejar abrigos o zapatos si es necesario. Además, encontraremos muebles de almacenaje para el uso requerido por el usuario.

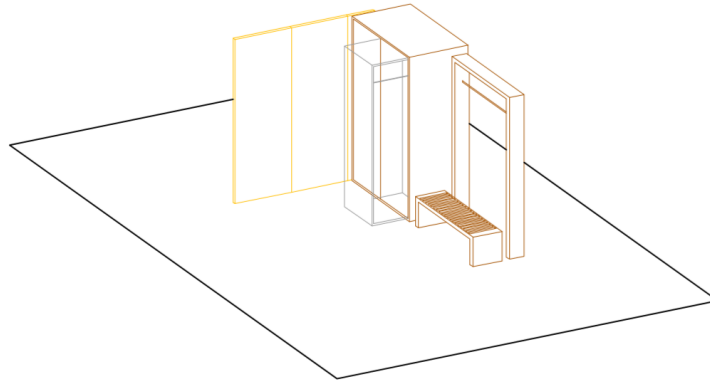


Figura 127 – Mobiliario entrada

- Baño

El baño, como hemos mencionado antes, no sufre cambios respecto a las diferentes combinaciones, hemos apostado por un baño con inodoro, lavabo y ducha. La ducha quedará integrada dentro de la fachada de la vivienda y contará con iluminación natural.

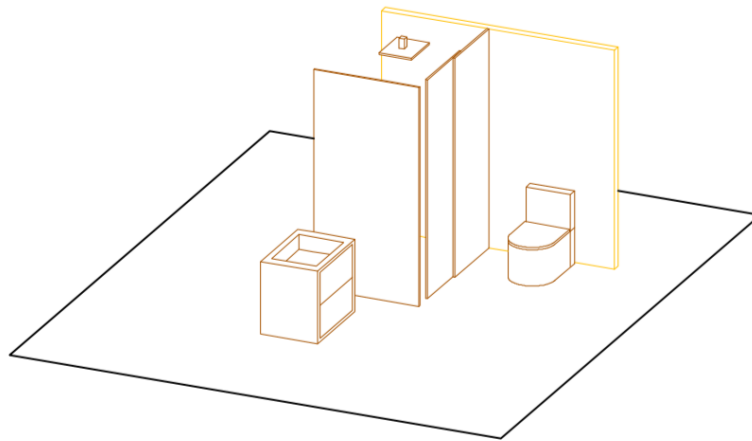


Figura 128 – Mobiliario baño

- Habitación individual / Despacho

La habitación individual contará con dos módulos, uno que se puede convertir en cama o en escritorio y otro que es un armario. Ambos están integrados en la fachada y permitirían el espacio interior diáfano.

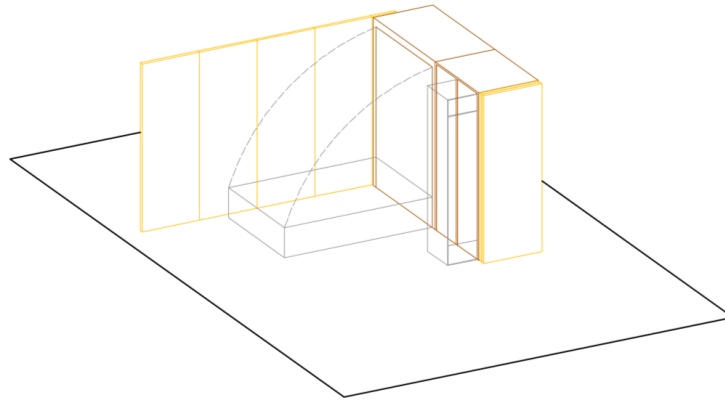


Figura 129 – Mobiliario habitación individual/despacho

- Habitación doble

La habitación doble cuenta con tres módulos, dos de ellos son armarios y uno es la cama doble que se abre desde su estructura que se encuentra integrada en la fachada.

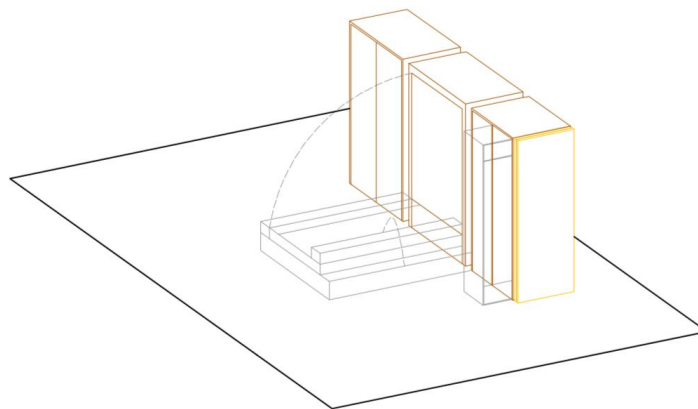


Figura 130 – Mobiliario habitación doble

- Salón

El salón está compuesto únicamente por un sofá y una mesa de trabajo. El sofá está integrado en la fachada, siendo una única estructura de madera sobre la que se colocan los cojines del sofá. Bajo de la estructura encontramos taburetes y mesitas que mejoran la comodidad y confort del salón. Por último, la televisión se resolvería por medio de un proyector que estaría integrado al cordón inferior de la estructura.

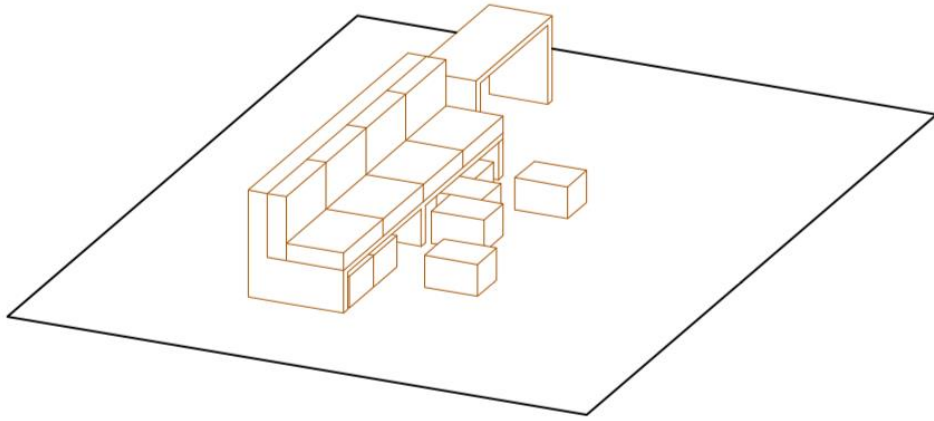


Figura 131 – Mobiliario salón

06.3.5_ Envolverte

Una vez el interior ya está diseñado, llega el momento de determinar cómo sería la envolverte de la vivienda, es decir, las 4 fachadas y la cubierta. El material escogido es también la madera, más concretamente, paneles prefabricados con acabado de madera que nos resuelvan los puentes térmico-acústicos que pueda tener. Acompañado obviamente de paños de vidrio que permitirán la entrada de luz cenital y por los laterales de la vivienda. Para explicar la envolverte hemos escogido el Caso 1 de las combinaciones anteriores.

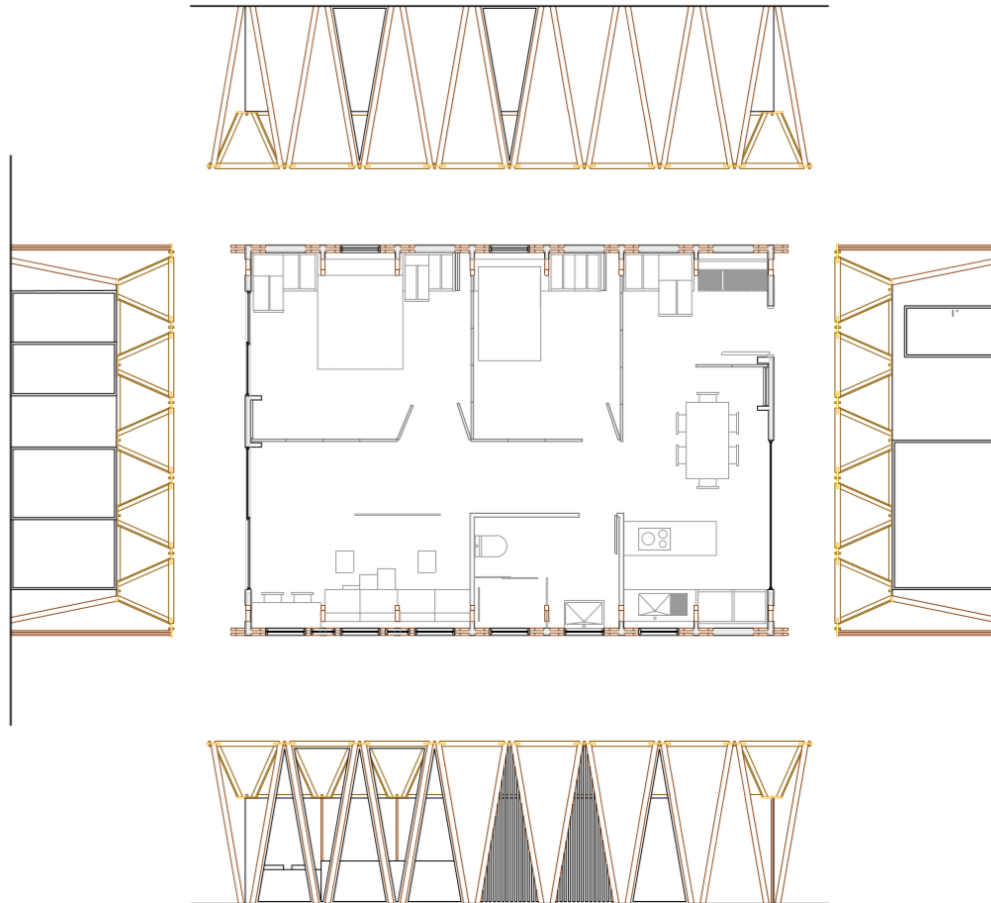
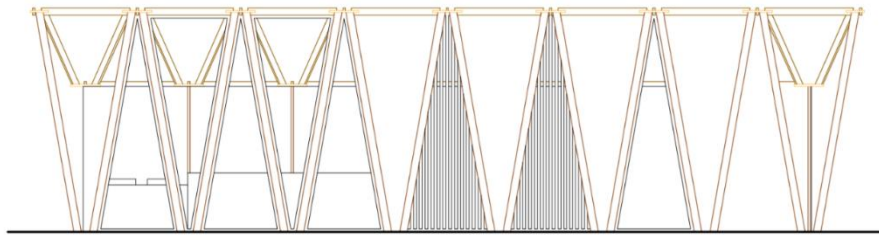
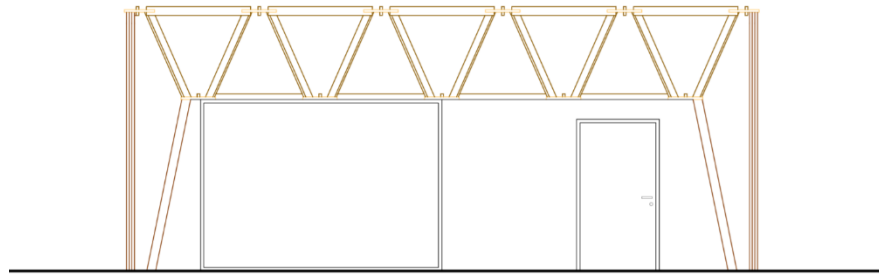
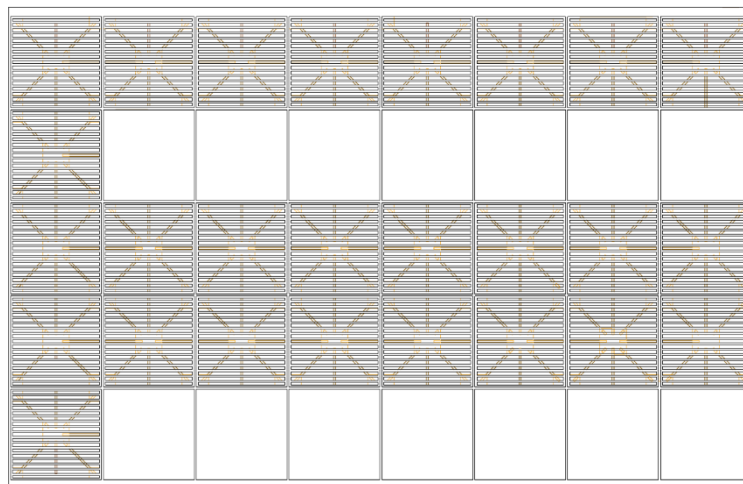


Figura 132 – Vistas generales

Tanto en las fachadas como en la cubierta, encontramos 3 tipos diferentes de revestimiento, tanto en las fachadas como en la cubierta:

- Opacos: panel de madera que no permite el paso de la luz.
- Lamas: lamas fijas de madera que sirven de filtro solar y visual y permiten el paso parcial de la luz., van acompañados siempre de vidrios transparentes.
- Vidrios: vidrios transparentes que se encuentran en las fachadas transversales y en las longitudinales y cubierta únicamente donde están las lamas. Permiten el paso de la luz natural.

A continuación, veremos dos fachadas tipo (longitudinal y transversal) y la cubierta

*Figura 133 – Fachada longitudinal**Figura 134 – Fachada transversal**Figura 135 - Cubierta*

Tras detallar la estructura, el programa, los espacios, el mobiliario y la envolvente, llegamos a una propuesta de vivienda unifamiliar diferente a las que hay en el mercado. Una propuesta que apuesta por la prefabricación, el diseño previo al detalle antes de la construcción, la sencillez estructural y el montaje rápido.

Pero esto es un ejemplo de cómo se puede utilizar el Sistema Tetragrid en la actualidad, gracias a las nuevas tecnologías y nuevas formas de vivir y de pensar de una sociedad que está en cambio continuo y necesitan viviendas y espacios que cambien a la vez.

A continuación, nos centraremos en el cálculo estructural y en la ejecución de puntos clave como son los nudos.

06.4_ Cálculo estructural

Para el cálculo estructural de la vivienda unifamiliar hemos optado por el programa CYPE, ya que nos permite el cálculo mediante madera maciza, que es el material que más se aproxima a la realidad, puesto que la estructura estaba pensada en madera laminada encolada.

06.4.1_ CYPE

Lo primero que hemos realizado es un modelo básico de las barras de la estructura, las mismas con las que realizamos la Maqueta 3. Para ello hemos contado con 4 tipos de barras. La Barra 1 es la que forma la cuadrícula de 1,75x1,75m que modula toda la estructura y los espacios interiores de la vivienda, tanto del cordón estructural superior como del inferior. La Barra 2 es la barra que une ambos cordones estructurales en diagonal y cuenta con una longitud de 1,6 metros, dando una superación de 1 metro entre ambos. Las barras 3 y 4 son las que forman los soportes de la estructura, la 3 cuenta con 3,6m de longitud y conecta el cordón superior con la cimentación. Por su parte, la Barra 4, de 2,65m de longitud une la cimentación con el cordón inferior de la estructura.

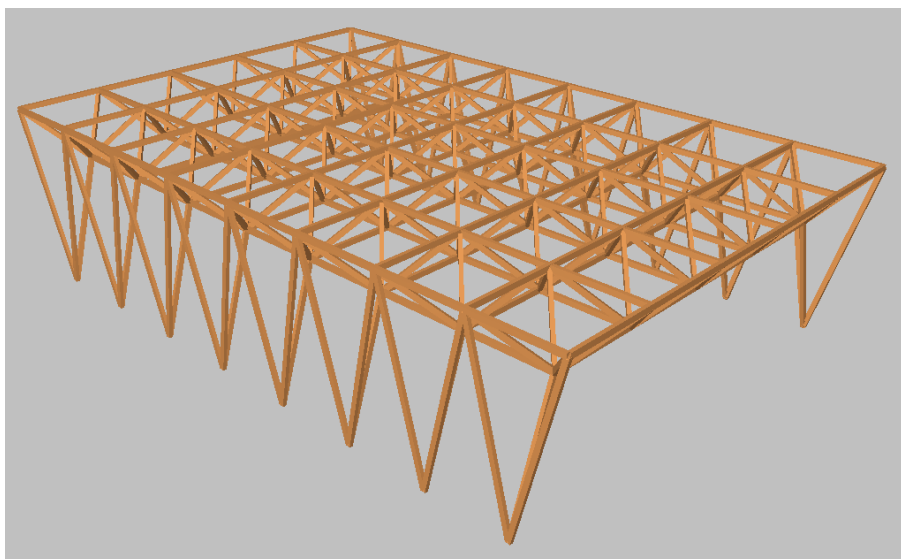


Figura 136 – Vista 3D de la estructura en CYPE3D

Barra	Longitud (m)	Unidades
1	1,75	160
2	1,6	160
3	3,6	32
4	2,65	16

Figura 137 – Tabla de tipos de barras

Una vez ya tenemos la geometría de los diferentes tipos de barras de la estructura y tras establecer que todos los nudos de vinculación interior son articulaciones y los de vinculación exterior son articulaciones con apoyo fijo, tal y como Ricolais los tenía en su Hangar Apex en Camerún, llega el momento de colocar las cargas sobre cada uno de los nudos, ya sean de la cubierta o de los diferentes alzados, según las acciones que tendrá que soportar la estructura.

En la cubierta, contaremos con las acciones de Peso Propio, la sobrecarga de uso de cubierta intransitable, únicamente para su construcción y mantenimiento, y la sobrecarga por nieve en la provincia de Alicante. En ella habrá tres tipos de nudo (A, B y C), según el área de acción de cada uno de ellos.

Nudos cubierta			
Nudos	Área de acción (m²)	Cargas	Fuerza (kN)
A	0,77	Peso Propio	1,6
		Sobrecarga de uso	0,8
		Nieve	0,15
B	1,53	Peso Propio	3,2
		Sobrecarga de uso	1,6
		Nieve	0,3
C	3,06	Peso Propio	6,4
		Sobrecarga de uso	3,2
		Nieve	0,6

Figura 138 – Tabla de Nudos en cubierta

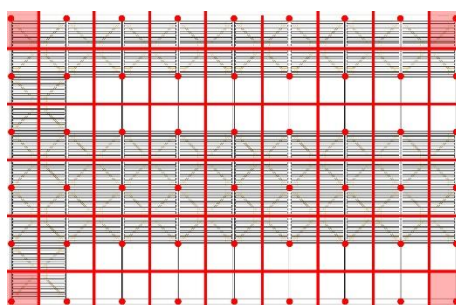


Figura 139 – Área de acción de Nudos A

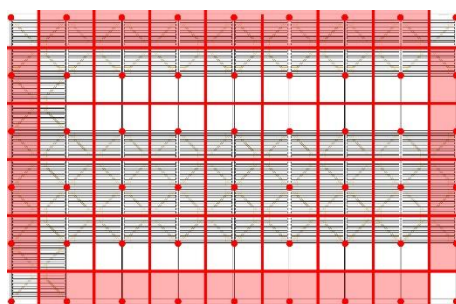


Figura 140 - Área de acción de Nudos B

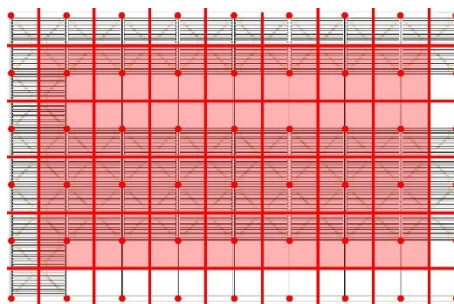


Figura 141 - Área de acción de Nudos C

Sobre el Alzado longitudinal calcularemos la acción de Viento 1, según la ubicación de la vivienda en una zona residencial en la provincia de Alicante. En ella habrá dos tipos de nudo (D y E), según el área de acción de cada uno de ellos.

Nudos alzado longitudinal			
Nudos	Área de acción (m ²)	Cargas	Fuerza (kN)
D	3,06	Viento 1	2,15
E	6,13	Viento 1	4,3

Figura 142 – Tabla de Nudos en alzado longitudinal

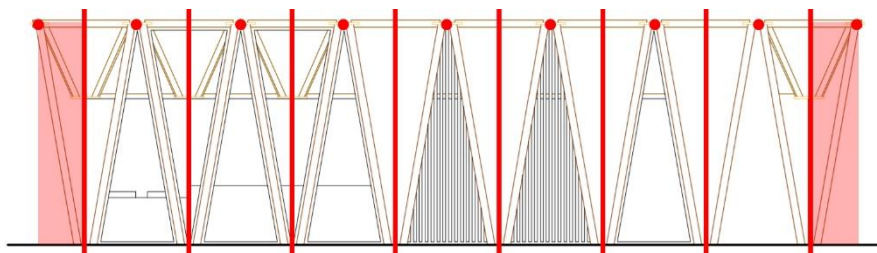


Figura 143 - Área de acción de Nudos D

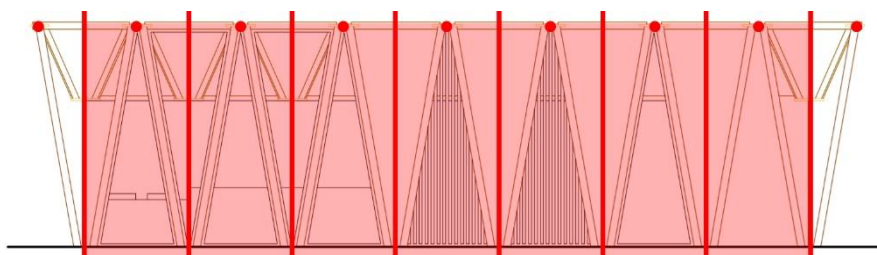


Figura 144 - Área de acción de Nudos E

Sobre el Alzado transversal calcularemos la acción de Viento 2, según la ubicación de la vivienda en una zona residencial en la provincia de Alicante. En ella habrá tres tipos de nudo (F, G y H), según el área de acción de cada uno de ellos.

Nudos alzado transversal			
Nudos	Área de acción (m ²)	Cargas	Fuerza (kN)
F	0,44	Viento 2	0,3
G	0,88	Viento 2	0,6
H	5,25	Viento 2	3,7

Figura 145 – Tabla de Nudos en alzado transversal

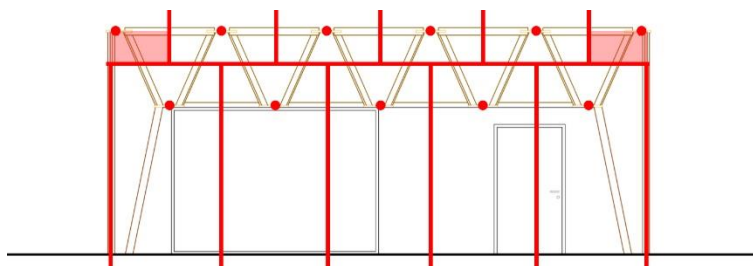


Figura 146 - Área de acción de Nudos F

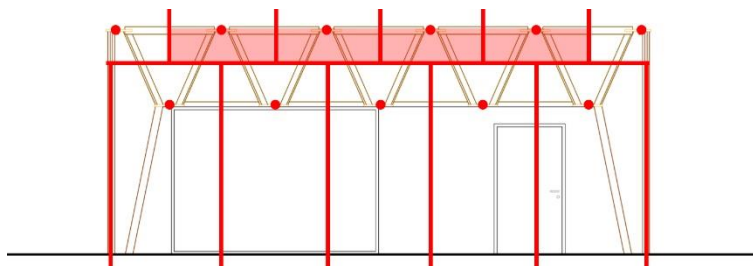


Figura 147 - Área de acción de Nudos G

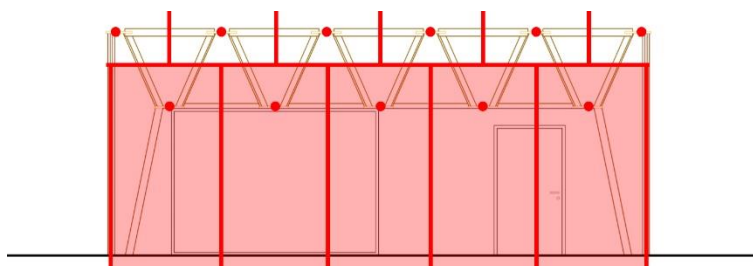


Figura 148 - Área de acción de Nudos H

Tras colocar todas las cargas en sus respectivos nudos, llega el paso del cálculo estructural de todas las combinaciones posibles que pueda sufrir la estructura. En el cálculo se comprueba tanto que la estructura sea suficientemente resistente como que no se mueva más de lo que se permite para un uso residencial, que está en una flecha máxima de $L/400$.

Gracias a CYPE podemos realizar el cálculo y estos son los resultados:

Barra	Longitud (m)	Unidades	Dimensiones sección (mm)
1	1,75	160	100x70 *
2	1,6	160	100x70
3	3,6	32	100x70
4	2,65	16	150X100

Figura 149 – Tabla de secciones finales de la estructura por barras

*4 barras de tipo 1 que se encuentran justo en el centro de la estructura necesitarían perfiles de 120x80 mm para no superar la resistencia máxima de la sección maciza de madera.

Como podemos observar, gracias a este sistema solo requeriríamos de dos tipos de secciones de madera maciza para realizar toda la estructura, algo que facilita su producción y posterior construcción. Ahora solo faltaría por realizar el diseño del nudo estructural que unirá las barras y permitirá que la estructura sea ligera, resistente y se desplace menos de lo permitido, albergando en su interior un programa de vivienda unifamiliar.

06.4.2_ Diseño del nudo

Una vez ya tenemos la dimensión de las barras que necesita la estructura para cumplir toda la normativa del CTE DB-HS, ya podemos dimensionar el nudo que necesitamos. Un nudo que va a partir de los estudios realizados con maquetas y de los dibujos e imágenes de los nudos realizados por Ricolais para que sea lo más aproximado posible. También me he inspirado en una empresa maderera de la ciudad de Almoradí, SIDA Madera, ya que son especialistas en la madera y han realizado proyectos de pérgolas de geometrías parecidas a las que existen en la vivienda.

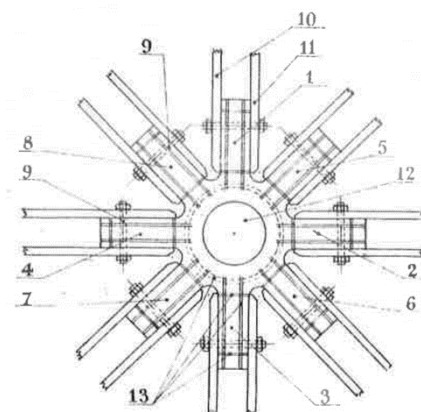


Figura 150 – Boceto del nudo de Ricolais

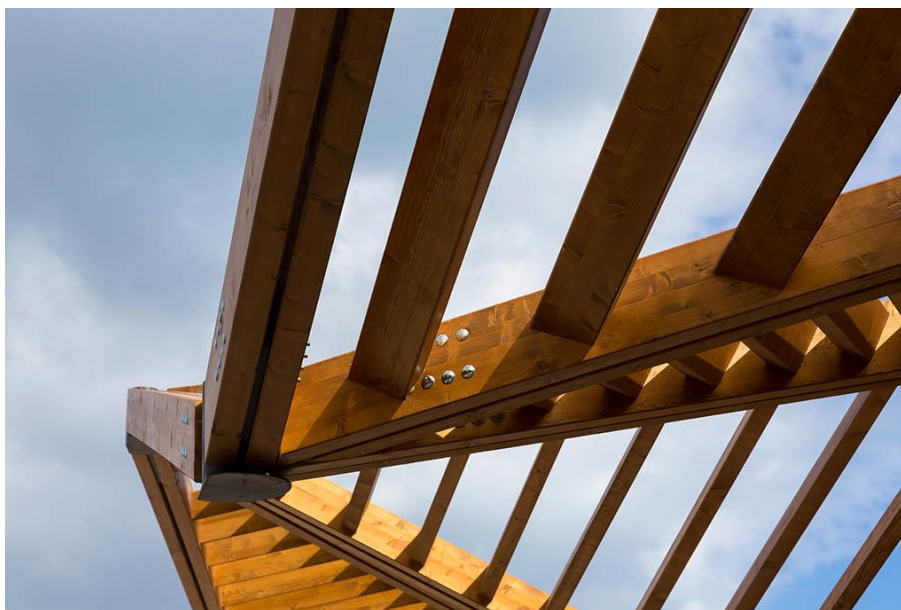


Figura 151 – Pérgola en el Albir de SIDA Maderas

Como se puede observar en ambas referencias, optamos por un nudo de base circular al que se le adhieren unas pletinas metálicas en la dirección que se necesite. A dichas pletinas se anclan las barras, compuestas por una doble sección de madera laminada encolada, más resistente que la madera maciza con la que se había realizado el cálculo de CYPE.

Las secciones estructurales calculadas en CYPE se cambian por otras con mayor resistencia, al aumentar de sección y mejorar el material, cumpliendo sin problemas el Código Técnico de la Edificación, en su Documento Básico de la Seguridad Estructural (CTE DB-SE), que es el que ahora nos interesa y debemos cumplir.

Barra	Longitud (m)	Unidades	Dimensiones sección CYPE (mm)	Dimensiones sección nuevas (mm)
1	1,75	160	100x70 *	2x (100x50)
2	1,6	160	100x70	2x (100x50)
3	3,6	32	100x70	2x (100x50)
4	2,65	16	150X100	2x (150x50)

Figura 152 – Tabla de las secciones finales de las barras

El nudo estará compuesto por un cilindro de 18cm de diámetro con pletinas de 10x15x1cm en cada una las barras que lleguen al nudo, en la dirección que se requiera. Los nudos se realizarán en una fábrica de metálicas directamente, no teniendo que realizar ningún trabajo más que el de atornillar en obra.

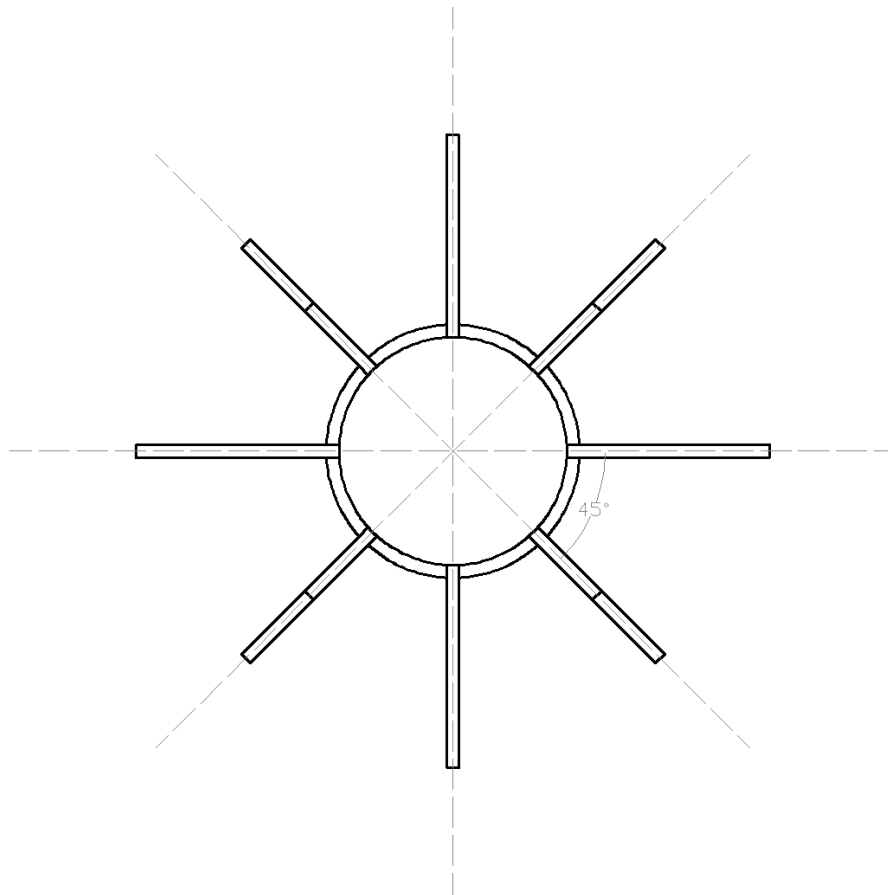


Figura 153 – Planta del nudo propuesto

Todos los nudos necesarios en la estructura saldrán del base de 8 pletinas, 4 de ellas conectan horizontalmente las barras que forman la malla de 1,75x1,75 de ambos cordones estructurales, las otras 4 pletinas son las que conectan los dos cordones con las barras de 1,60m.

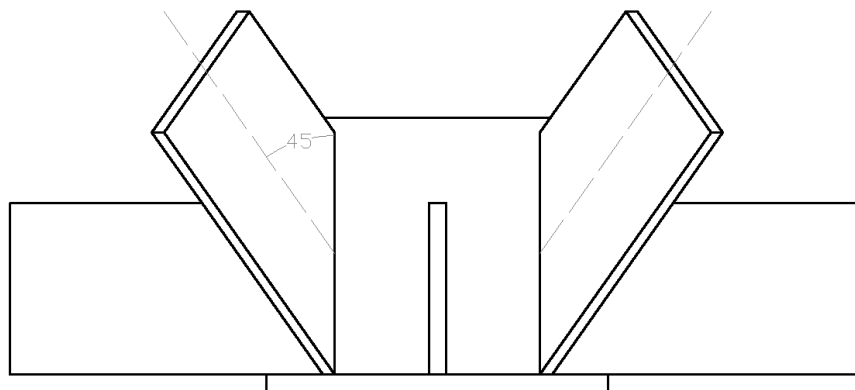


Figura 154 – Alzado del nudo propuesto

El resultado final con las barras sería el siguiente:

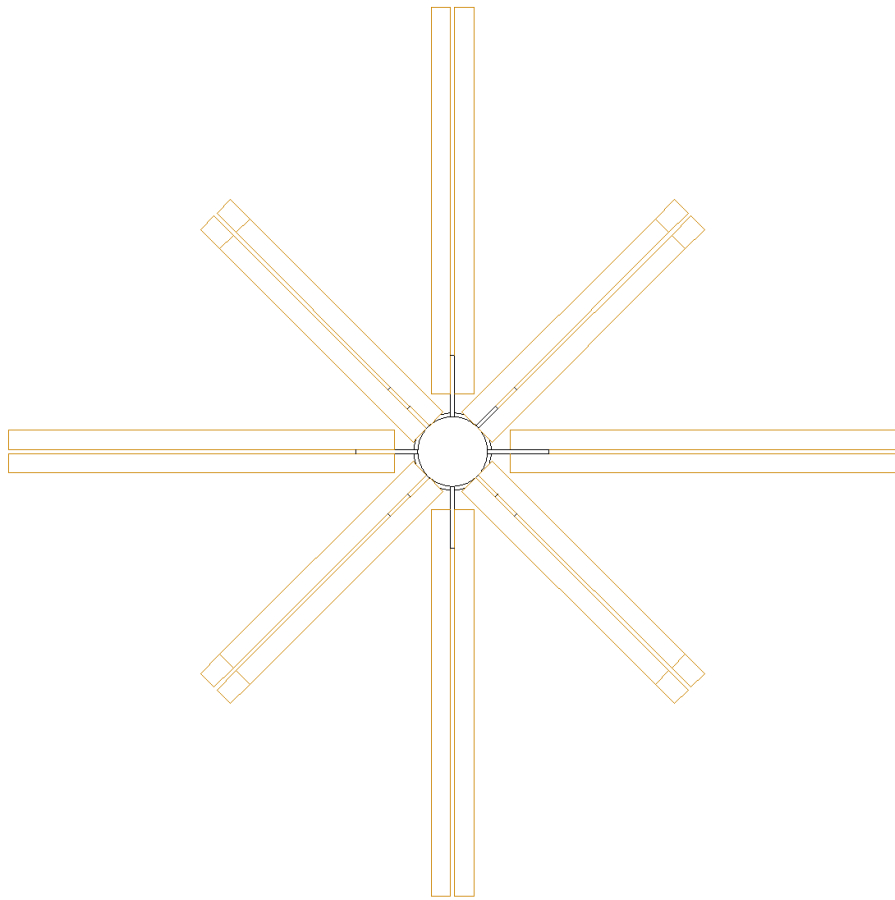


Figura 155 – Planta del nudo con las barras

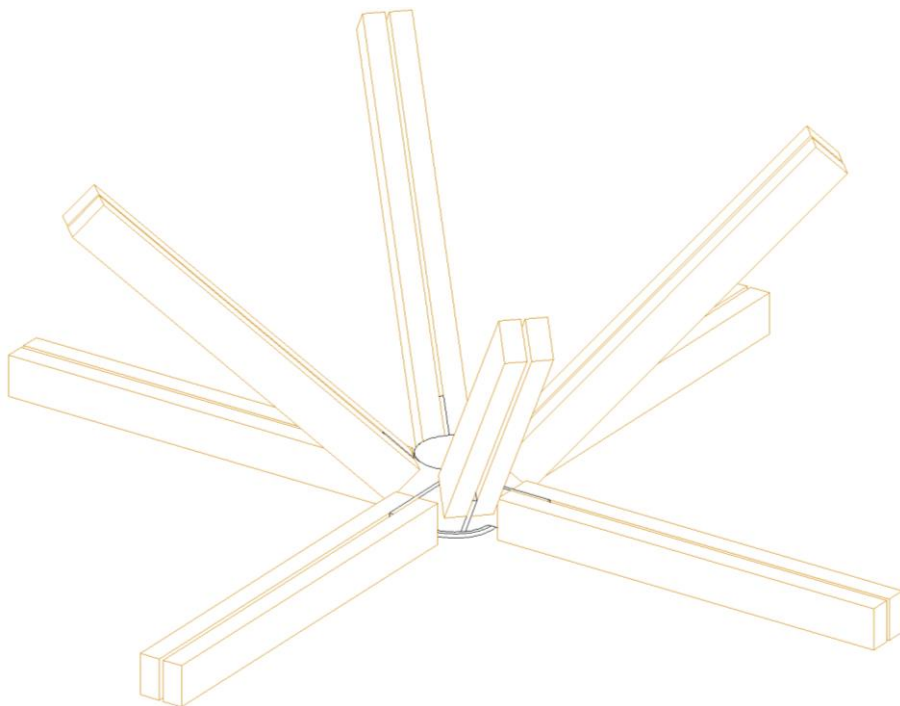


Figura 156 – Vista axonométrica del nudo con las barras

06.4.3_ Estudio de optimización estructural

En un principio se empezó a realizar un estudio de optimización estructural del Sistema Tetragrid, ajeno del diseño de la vivienda unifamiliar, gracias al plugin de parametrización con el que cuenta el programa Rhinoceros, llamado Grasshopper. El cual me permitía controlar todas las dimensiones de la geometría del sistema, pudiendo crecer tanto en módulos como en longitud tanto como se quisiera.

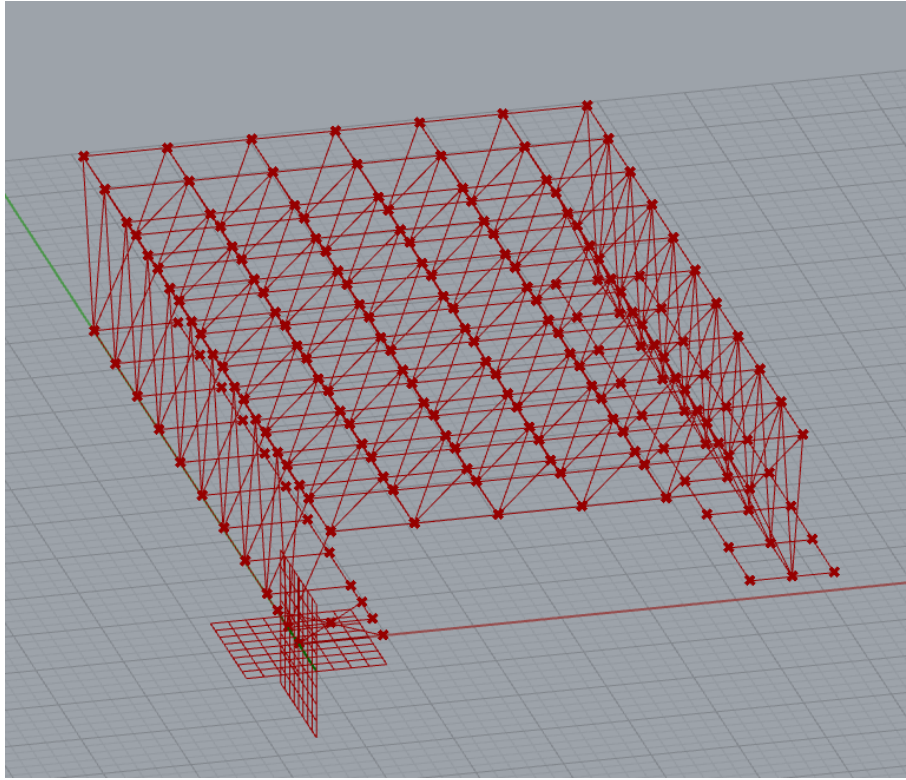


Figura 157 – Ejemplo 1 Grasshopper

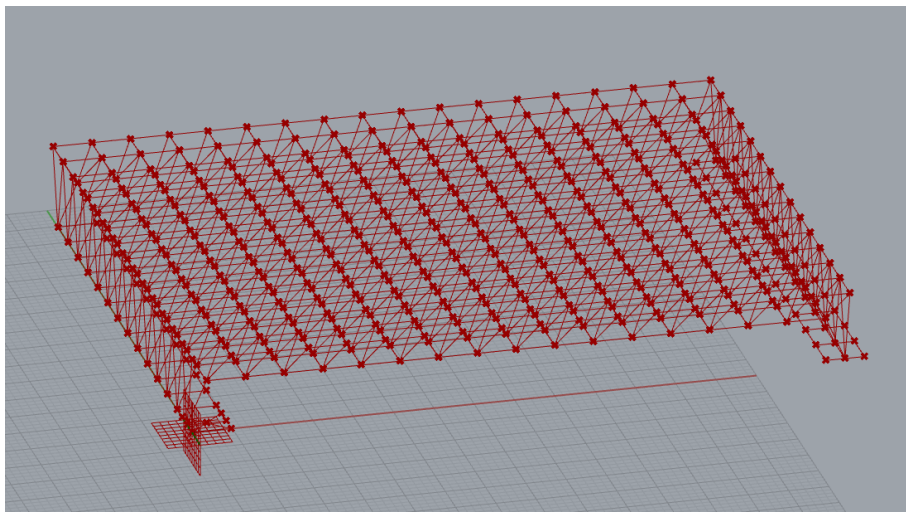


Figura 158 – Ejemplo 2 Grasshopper

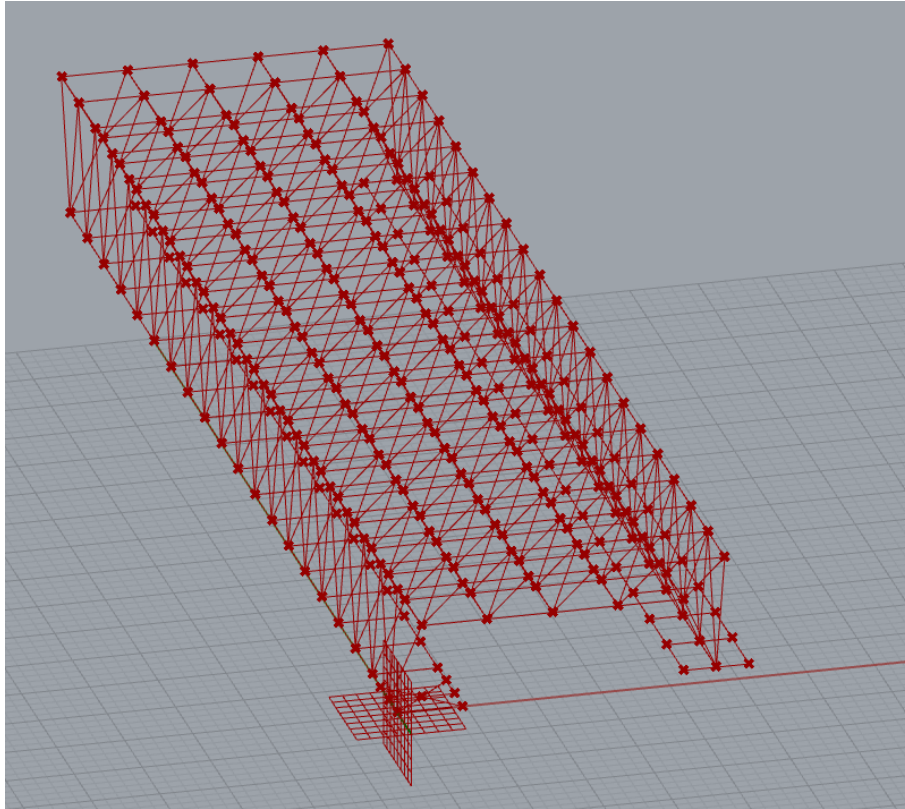


Figura 159 – Ejemplo 3 Grasshopper

La intención del estudio era llegar a optimizar el sistema estructural en diferentes casos de estudio gracias a aplicaciones internas de Grasshopper como son Karamba 3D para el cálculo estructural y Galapagos para la optimización de cualquier factor. Unos casos de estudio con los que quería explorar las diferentes posibilidades que podía llegar a tener el sistema en la actualidad con diferentes usos como pabellones deportivos, aeropuertos o viviendas unifamiliares, como en la propuesta de proyecto.

Debido a la complejidad del estudio, conseguí llegar hasta la fase de control geométrico, en el cual la estructura tiene libertad completa en la cantidad de módulos, longitud de barras y altura de la cubierta, pero no pude llegar a calcularlo estructuralmente con Karamba 3D por la limitación del programa en su versión para estudiantes. Por tanto, no pude terminar el estudio de optimización que me propuse en un principio.

A pesar de ello, el intento de estudio me sirvió para conocer más a fondo la estructura y saber controlarla para transformarla en una arquitectura parametrizada. Como decía Ricolais “*alcanzar la meta no es lo importante, sino lo que aprendes por el camino hasta ella*”, pues yo he aprendido de este camino para conocer más el sistema y poder realizar un diseño más completo y real.

Mi intención es acabar el estudio en el futuro más cercano posible, ya que veo que dicho sistema estructural puede ser muy útil para muchos usos actuales.

07_ CONCLUSIONES

Tras haber realizado el estudio del trabajo de Robert Le Ricolais me gustaría destacar, por encima de todo, su forma de trabajar. Un trabajo que se basaba en experimentar, fallar, aprender del error, mejorar y seguir experimentando, así hasta que se llegue a una meta autodefinida. Todo ello fue posible gracias al gran interés que tenía por llegar a su meta de “*peso cero, luz infinita*”, una meta inalcanzable pero cuyo camino de experimentación dejó grandes descubrimientos y topologías estructurales para arquitectos e ingenieros futuros.

Unas topologías que le beneficiaban a la hora de experimentar, ya que no eran nada definido, pero podían tender a diferentes tipologías y sus estudios podían llegar a utilizarse en diferentes disciplinas fuera de la arquitectura e ingeniería.

En la actualidad nos encontramos con una sociedad que no está acostumbrada al fracaso, una sociedad que cuando falla se rinde, una sociedad que no muestra un interés mayúsculo por el trabajo que desarrolla y si alguien lo muestra, muchas veces la misma sociedad lo llega a tachar de extraño. Como en todo, siempre hay excepciones, hay gente que, como Ricolais, muestra un interés por su trabajo y no deja que un pequeño fallo le haga dejar de luchar por lo que tanto ha soñado.

Y es que Ricolais no fue una persona exitosa, nunca llegó a construir muchos de sus mejores descubrimientos, pero esto no hizo que no dejara de experimentar y mejorar esos experimentos. La sociedad actual debería de mirar a la figura de Ricolais y amar lo que hace cada día.

Esa forma de trabajar de Ricolais, se basa en ir evolucionando una idea desde una topología, a una o varias tipologías y, finalmente, hacerlo realidad mediante una obra. Unas topologías que daban pie a diferentes aproximaciones, algo que, como hemos visto con la impresión 3D, se sigue haciendo en la actualidad. Y es que la potencia de los estudios de Ricolais es que conforme más van avanzando las tecnologías, más usos diferentes se les puede dar. Antes esos estudios únicamente se podían utilizar en la arquitectura e ingeniería más cualificada, pero actualmente se ha demostrado que las teorías en las que se basaban se pueden llegar a utilizar en disciplinas muy distintas como son la medicina, el diseño o el arte.

Y es que vivimos en una época en la que las tecnologías están en continua evolución, siempre hay algo nuevo o una mejora de lo que ya existía. Por este motivo, hay que conocer cómo se trabajaba en el pasado y las teorías que se utilizaban para poder realizar una nueva versión de esos trabajos y estudios utilizando las tecnologías de nuestro momento. Nos sucede justo lo inverso que nuestros antepasados, ellos ante la falta de tecnología, realizaban más estudios teóricos y nosotros, ante la gran cantidad de tecnología con la que contamos, hemos dejado un poco de lado todo el tema teórico, la combinación de la teoría de nuestros antepasados con las tecnologías del presente puede dar lugar a un futuro de innovación y desarrollo en todos los aspectos, tanto teórico como tecnológico.

Desde la experimentación personal, tras haber seguido todos los pasos de Ricolais con el sistema Tetragrid hasta llegar a una propuesta personal de vivienda unifamiliar, tengo que decir que seguir cada paso me ha hecho conocer a fondo la estructura y poder tomar decisiones de forma autónoma, decisiones que tienen como propósito mejorar la habitabilidad del espacio y hacer posible el programa definido, ya que la función que tiene

la estructura es organizar el espacio gracias a los huecos que hay en ella. Huecos que pueden ser tanto la luz que cubre la estructura como los espacios que hay entre los elementos de una estructura espacial.

Con la topología descubrí el funcionamiento del sistema, comprobé cómo funcionaba mejor y vi dónde se encontraban los puntos débiles de la estructura, unos puntos débiles a tener en cuenta para el futuro desarrollo de la propuesta. Cabe destacar que yo partí de una tipología desarrollada por el propio Ricolais, una tipología pensada e utilizada para un uso de cubierta, ya fuera como hangar o nave en la que sucedían acciones en su interior.

Para la propuesta no quise realizar lo mismo que anteriormente realizó Ricolais, sino que quise darle un uso contemporáneo a la tipología estructural. Decidí darle un uso de vivienda, pero una vivienda convencional compartimentada, que se podía haber realizado sin problemas, sino que quise ir un poco más allá y realizar una propuesta que se adapte a la sociedad una actual. Una vivienda flexible, que se adapte a las necesidades del usuario, que pueda cambiar sus espacios en cuestión de minutos y que pase de una vivienda convencional para una familia a un despacho profesional o pueda ser ambas cosas a la vez. Y es que estamos en una sociedad que pide eso, una sociedad en continuo cambio y en la que mañana puede ser que no valga lo que sí que valía ayer. Por tanto, necesita una arquitectura que le permita hacer todos esos cambios de forma rápida y efectiva.

En cuanto a la decisión del material, opté por la madera por ser el material más natural y ecológico, y cuya producción está muy controlada en la actualidad para evitar la deforestación de los bosques. Un material al que además tienen acceso en casi cualquier parte del mundo y cuya ejecución en obra es muy sencilla, ya que en el proceso de diseño se especifica todo con gran detalle para que en la obra no haya ningún problema. Esa necesidad de un diseño en detalle y de calidad, pone en valor la figura de los arquitectos, una figura que se va deteriorando en la arquitectura convencional, ya que los sistemas constructivos están muy controlados por las empresas.

Para concluir, quería decir que ha sido una experiencia muy positiva y enriquecedora el estudiar a fondo el y trabajo y vida de un profesional tan excepcional en su especialidad como lo fue Ricolais. De él he aprendido que no hay que rendirse nunca, que hay que amar el trabajo que realizas y que hay que estar en continua innovación para poder aportar algo nuevo a la sociedad. Creo que era una persona que creía firmemente en la gran importancia que tienen la figura de los arquitectos e ingenieros en la sociedad, unos profesionales cuya misión es mejorar la calidad de vida de los habitantes, ya sea con nuevas formas de transporte, con mejores instalaciones o con viviendas residenciales en las que los usuarios se sientan cómodos. Ricolais confiaba en la multidisciplinariedad de la profesión y apostaba por el trabajo conjunto de ingenieros y arquitectos, aportando cada uno de ellos sus conocimientos y complementándose.

Creo que esto es con lo que más me voy a quedar, con la necesidad del trabajo conjunto por el bien del usuario o usuarios finales, ya que estamos en una época en la que los ingenieros y arquitectos cada vez saben más de una cosa en concreto y necesitan formar parte de equipos de trabajo en los que se encuentran muchos especialistas que trabajan de forma conjunta y se mejoran los unos a los otros.

08_ BIBLIOGRAFÍA

ARTÍCULOS

A01_ Juárez, A. (1996) *A propósito de Robert Le Ricolais*. Revista "Arquitectos" (n. 141); pp. 72-76. ISSN 0214-1124.

A02_ Vrontissi, M. (2016) *The physical model in the structural studies of Robert Le Ricolais: "apparatus" or "hierogram"*. Conferencia: 3º Conferencia de Estructuras y Arquitectura, Guimaraes, Portugal. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/305768905_The_physical_model_in_the_structural_studies_of_Robert_Le_Ricolais_apparatus_or_hierogram

A03_ Langlois, G. (2017) *À Yaoundé, la halle APLEX ultime de Robert Le Ricolais*. Archivos abiertos HAL. Recuperado de: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01527064v2/document>

A04_ Pérez García, A. (2009) *Natural structures: Strategies for geometric and morphological optimization*. Conferencia IASS 2009: Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures, Valencia, España. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/50838824_Natural_structures_Strategies_for_geometric_and_morphological_optimization

BLOGS

B01_ Lacasta, M. (2014) *Le Ricolais*. Recuperado de: <https://axonometrica.wordpress.com/2014/12/08/le-ricolais/>

B02_ Prudence, P. (2014) *Robert Le Ricolais's Tensegrity Models – "The Art os Structures is Where to Putt he Holes"*. Recuperado de: <https://www.dataisnature.com/?p=2053>

B03_ Olivia Butler, C. (2011) *Le Ricolais*. Recuperado de: <https://wewanttolearn.wordpress.com/2011/11/01/le-ricolais/>

LIBROS

L01_ Le Ricolais, R. (1997) *Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]*. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

L02_ Heyman, J. (2004) *Análisis de Estructuras: un estudio histórico*. Madrid. Instituto Juan de Herrera. ISBN: 84-9728-112-8.

L03_ Beukers, A. (2005) *Lightness: the inevitable renaissance of minimun energy structures*. Rotterdam. 010 Publishers. ISBN: 90-6450-560-8.

REVISTAS

R01_ Seáis, R., Sastre, R., Brufau, R., Carbajal, E.C. (2014). Estudio para la optimización de mallas estructurales de acero envolventes de edificios en altura según sus solicitaciones,

en base al análisis de sus líneas isostáticas. *Informes de la Construcción*, 66(EXTRA-1): m005. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.094>.

NORMATIVAS

N01_ Código Técnico de la Edificación (CTE)

N02_ Documento Básico Seguridad Estructural (CTE DB-SE)

PÁGINAS WEBS

P01_ Almanac (1996) *Visions and Paradox*. Recuperado de:

<https://almanac.upenn.edu/archive/v42/n19/ricolais.html>

P02_ Centre Pompidou (1977) *Archivo: Robert Le Ricolais*. Recuperado de:

https://www.centrepompidou.fr/cpv/ressource.action?param.id=FR_R-efa2b030acb28a375faedde0ccb27e89¶m.idSource=FR_P-efa2b030acb28a375faedde0ccb27e89

P03_ Polyhedral Atlas (2019) *From Space-Frames to Space*. Recuperado de:

<https://sites.google.com/site/polyhedralatlas/home/14-1963-le-ricolais>

P04_ Images d'Art (2019) *Robert Le Ricolais*. Recuperado de:

<https://art.rmngp.fr/fr/library/artworks?authors=Robert%20Le%20Ricolais>

P05_ Universalis (2019) *Robert Le Ricolais*. Recuperado de:

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/robert-le-ricolais/>

P06_ Universalis (2019) *Robert Le Ricolais*. Recuperado de:

<https://www.universalis.fr/carte-mentale/robert-le-ricolais/>

TESIS

T01_ Fontana Cabezas, J.J. (2012) *El diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente*. (Tesis Doctoral) Departamento de Expresión Gráfica y Cartografía. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Alicante. Recuperado de: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/26859?locale=en>

T02_ González Meza, E. (2016) *Estructuras de Retícula Triangular. Transformaciones Constructivas de las Edificaciones*. (Tesis Doctoral) Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: <http://oa.upm.es/42929/>

T03_ Sanchís Signes, A. (2017) *Evolución en el diseño estructural de los edificios en altura*. (Trabajo de Fin de Grado) Grado en Fundamentos de la Arquitectura. Universidad de Alicante. Recuperado de: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/49478>

BIBLIOGRAFÍA DE IMÁGENES

Figura 1 – Sección Cuevas de Canelobre (Dibujo). Recuperado de: <http://www.senderosdealicante.com/geologicos/geologicosv/lugares/canelobre.html>

Figura 2 – Tumbas (Imagen). Recuperado de: <https://www.diariodepontevedra.es/articulo/noticias/requiem-por-las-tumbas-mas-antiguas/20150802000000281274.html>

Figura 3 – Stonehenge (Imagen). Recuperado de: <https://www.english-heritage.org.uk/visit/places/stonehenge/>

Figura 4 – Sección Pirámide de Gizeh (Dibujo). Recuperado de: https://inspirestory.com/great-pyramids-true-purpose-now-revealed_41830.html

Figura 5 – Imagen de la Gran Galería (Imagen). Recuperado de: <http://www.egyptforever.hu/en/articles/places-in-egypt/the-great-pyramid-of-giza.html>

Figura 6 – Templo egipcio (Dibujo). Recuperado de: <https://archaeology-travel.com/news/temple-of-khonsu-at-karnak/>

Figura 7 – Templo griego (Dibujo). Recuperado de: <https://www.reed.edu/humanities/110Tech/Parthenon.html>

Figura 8 – Templo romano (Dibujo). Recuperado de: https://en.wikipedia.org/wiki/Temple_of_Portunus

Figura 9 – Sección iglesia románica (Dibujo). Recuperado de: <http://art.lostonsite.com/67021112-010/>

Figura 10 – Sección iglesia gótica (Dibujo). Recuperado de: <https://no.wikipedia.org/wiki/Strebue>

Figura 11 – Galileo Galilei (Dibujo). Recuperado de: Heyman, J. (2004) Análisis de Estructuras: un estudio histórico. Madrid. Instituto Juan de Herrera. ISBN: 84-9728-112-8.

Figura 12 – Dibujos de los ensayos de Galileo (Dibujo). Recuperado de: Heyman, J. (2004) Análisis de Estructuras: un estudio histórico. Madrid. Instituto Juan de Herrera. ISBN: 84-9728-112-8.

Figura 13 – Home Insurance Building, Chicago, 1885 (Imagen). Recuperado de: https://en.wikipedia.org/wiki/Home_Insurance_Building

Figura 14 – Esquema estructural 1 (Dibujo). Elaboración propia

Figura 15 – Esquema estructural 2 (Dibujo). Elaboración propia

Figura 16 – Esquema estructural 3 (Dibujo). Elaboración propia

Figura 17 – Pier Luigi Nervi (Imagen). Recuperado de: <http://pierluiginervi.org/>

Figura 18 – Ricolais en el laboratorio (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 19 – Robert Le Ricolais (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 20 – Dibujo de un radiolario (Dibujo). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 21 – Bocetos de Ricolais (Dibujo). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 22 – Cuadro de Ricolais (Imagen). Recuperado de: Centre Pompidou (1977) *Archivo: Robert Le Ricolais*.

https://www.centrepompidou.fr/cpv/ressource.action?param.id=FR_R-efa2b030acb28a375faedde0ccb27e89¶m.idSource=FR_P-efa2b030acb28a375faedde0ccb27e89

Figura 23 – Estructura interna de los huesos (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 24 – Laboratorio de Ricolais (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 25 – Ricolais en el laboratorio con alumnos (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 26 – Pruebas de carga del Funicular Polygon of Revolution (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 27 – Maqueta del Funicular Polygon of Revolution (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 28 – Maqueta del Funicular Polygon of Revolution (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 29 – Maqueta del Funicular Polygon of Revolution (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 30 – Bocetos (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 31 – Bocetos (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 32 – Maqueta red Trihex (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 33 – Maqueta red Trihex (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 34 – Cálculos red Trihex (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 35 – Simulación Torre Alta Tensión (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 36 – Bocetos (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 37 – Maqueta Tube (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 38 – Maqueta Tension Net Structure (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 39 – Maqueta Tube (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 40 – Bocetos (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 41 – Bocetos (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 42 – Bocetos (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 43 – Maquetas del Isoflex (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 44 – Bocetos (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 45 – Maqueta del sistema Octen (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 46 – Maquetas de Pretension Transmission (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 47 – Burbujas (Imagen). Recuperado de:
<https://connectedscapes.wordpress.com/2013/04/10/estructuras-organicas-comportamiento-estructural-de-las-burbujas/>

Figura 48 – Estudios (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 49 – Maqueta del Monkey Saddle (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 50 – Bocetos (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 51 – Maqueta del Octaedro (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 52 – Maqueta del Monkey Saddle (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 53 – Maqueta del Sistema Tetragrid (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 54 – Maqueta del Sistema Tetragrid (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 55 – Maqueta del Sistema Tetragrid (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 56 – Maqueta del Sistema Tetragrid (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 57 – Boceto Nudo Aplex (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 58 – Postes King y Queen (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 59 – Maqueta del sistema Polygen (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 60 – Sistema Polygen triplicado (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 61 – Bocetos del sistema Polygen como puente (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 62 – Maqueta del sistema Polygen como cubierta (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 63 – Kahn y Ricolais (Imagen). Recuperado de:
<https://philly.curbed.com/2017/8/11/16126212/louis-kahn-power-of-architecture-exhibit-philadelphia>

Figura 64 – City Tower (Imagen). Recuperado de:
<http://architectuul.com/architecture/city-tower>

Figura 65 – Fuller (Imagen) Recuperado de:
<https://www.forbes.com/sites/davidewalt/2011/10/27/buckminster-fullers-design-for-the-stars/#2c97a9c34216>

Figura 66 – Dymaxion House (Imagen) Recuperado de:
<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/casa-wichita/>

Figura 67 – Nervi (Imagen). Recuperado de: <http://pierluiginervi.org/>

Figura 68 – Hangar militar (Imagen). Recuperado de:
<https://www.arquitecturayempresa.es/noticia/el-ingeniero-que-eclipso-los-arquitectos-pier-luigi-nervi>

Figura 69 – Tange (Imagen). Recuperado de: <http://architectuul.com/architect/kenzo-tange>

Figura 70 – Pabellón de Japón, EXPO Osaka 1970 (Imagen). Recuperado de:
<https://oma.eu/publications/project-japan-metabolism-talks>

Figura 71 – Wachsmann (Imagen). Recuperado de:
<https://www.adk.info/index.php/konrad-wachsmann-92106.en.html>

Figura 72 – USAF Aircraft Hangar (Imagen) Recuperado de:
<https://www.atlasofplaces.com/architecture/usaf-aircraft-hangar/>

Figura 73 – Diseño nudo (Imagen) Recuperado de:
<https://www.atlasofplaces.com/architecture/usaf-aircraft-hangar/>

Figura 74 – Otto (Imagen). Recuperado de: <https://www.detail-online.com/article/research-development-and-daring-frei-otto-wins-the-pritzker-prize-26524/>

Figura 75 – Deutscher Pavillon (Imagen). Recuperado de: <https://www.detail-online.com/article/research-development-and-daring-frei-otto-wins-the-pritzker-prize-26524/>

Figura 76 – Piano y Rogers (Imagen). Recuperado de: <https://www.rsh-p.com/projects/centre-pompidou/>

Figura 77 – Georges Pompidou Centre (Imagen). Recuperado de: <https://www.rsh-p.com/projects/centre-pompidou/>

Figura 78 – Foster (Imagen) Recuperado de: <https://www.fosterandpartners.com/>

Figura 79 – British Museum (Imagen) Recuperado de:
<https://www.fosterandpartners.com/>

Figura 80 – Future Systems (Imagen). Recuperado de: <http://www.future-systems.com/>

Figura 81 – Coexistence Tower (Imagen). Recuperado de:
<https://bustler.net/news/1018/architect-of-the-future-exhibition-celebrates-jan-kaplick-s-work>

Figura 82 – Simon Parsons (Imagen). Recuperado de:
<http://www.ptw.com.au/team/simon-parsons/>

Figura 83 – Estructura del Watercube (Imagen). Recuperado de: <http://www.ptw.com.au/>

Figura 84 – COX logo (Imagen). Recuperado de: <https://www.coxarchitecture.com.au/>

Figura 85 – Helix Bridge (Imagen). Recuperado de: <https://www.coxarchitecture.com.au/>

Figura 86 – Toyo Ito (Imagen). Recuperado de: <http://www.toyo-ito.co.jp/>

Figura 87 – Mediateca de Sendai (Imagen). Recuperado de: <http://www.toyo-ito.co.jp/>

Figura 88 – Puente (Imagen). Recuperado de: <https://iaac.net/project/3d-printed-bridge/>

Figura 89 – Diagramas estructurales (Imagen). Recuperado de: <https://iaac.net/project/3d-printed-bridge/>

Figura 90 – Nudo 3D mueble (Imagen). Recuperado de: <https://3dprint.com>

Figura 91 – Nudo 3D mueble (Imagen). Recuperado de: <https://3dprint.com>

Figura 92 – Soporte 3D mesa (Imagen). Recuperado de: <https://3dprint.com>

Figura 93 – Férula brazo (Imagen). Recuperado de: <https://fiixit.es/>

Figura 94 – Férula mano (Imagen). Recuperado de: <https://fiixit.es/>

Figura 95 – Férula brazo (Imagen). Recuperado de: <https://fiixit.es/>

Figura 96 – Reflejo nudo (Imagen). Recuperado de:
<https://twitter.com/fadaclo/status/861228105393942530>

Figura 97 – Maqueta (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 98 – Sistema en reposo (Imagen). Elaboración propia

Figura 99 – Sistema en tracción (Imagen). Elaboración propia

Figura 100 – Maqueta sistema Tetragrid – Cubierta plana (Imagen). Recuperado de: Centre Pompidou (1977) *Archivo: Robert Le Ricolais*.
https://www.centrepompidou.fr/cpv/ressource.action?param.id=FR_R-efa2b030acb28a375faedde0ccb27e89¶m.idSource=FR_P-efa2b030acb28a375faedde0ccb27e89

Figura 101 – Maqueta sistema Tetragrid – Cubierta curva a dos aguas (Imagen). Recuperado de: Centre Pompidou (1977) *Archivo: Robert Le Ricolais*.
https://www.centrepompidou.fr/cpv/ressource.action?param.id=FR_R-efa2b030acb28a375faedde0ccb27e89¶m.idSource=FR_P-efa2b030acb28a375faedde0ccb27e89

Figura 102 – Maqueta sistema Tetragrid (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 103 - Maqueta sistema Tetragrid (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 104 - Maqueta sistema Tetragrid (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 105 – Dibujo del nudo (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 106 – Prototipo del nudo (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 107 – Dossier informativo del Hangar Aplex (Imagen). Recuperado de: Langlois, G. (2017) *À Yaoundé, la halle APLEX ultime de Robert Le Ricolais*. Archivos abiertos HAL. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01527064v2/document>

Figura 108 – Imagen del mercado de Camerún en construcción (Imagen). Recuperado de: Langlois, G. (2017) *À Yaoundé, la halle APLEX ultime de Robert Le Ricolais*. Archivos abiertos HAL. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01527064v2/document>

Figura 109 – Alzado Maqueta 2 (Imagen). Elaboración propia

Figura 110 – Cubierta Maqueta 2 (Imagen). Elaboración propia

Figura 111 – Esquema de la parcela a edificar (Imagen). Elaboración propia

Figura 112 – Elementos que componen la maqueta (Imagen). Elaboración propia

Figura 113 – Alzado Maqueta 3 (Imagen). Elaboración propia

Figura 114 – Cubierta Maqueta 3 (Imagen). Elaboración propia

Figura 115 – Diagramas vivienda unifamiliar (Imagen). Elaboración propia

Figura 116 – Planta Combinación 1 (Imagen). Elaboración propia

Figura 117 – Planta Combinación 2 (Imagen). Elaboración propia

Figura 118 – Planta Combinación 3 (Imagen). Elaboración propia

Figura 119 – Planta Combinación 4 (Imagen). Elaboración propia

Figura 120 – Planta Combinación 5 (Imagen). Elaboración propia

Figura 121 – Planta Combinación 6 (Imagen). Elaboración propia

Figura 122 – Planta Combinación 7 (Imagen). Elaboración propia

Figura 123 – Planta combinación 8 (Imagen). Elaboración propia

Figura 124 – Planta Combinación 9 (Imagen). Elaboración propia

Figura 125 – Mobiliario vivienda (Imagen). Elaboración propia

Figura 126 – Mobiliario cocina (Imagen). Elaboración propia

Figura 127 – Mobiliario entrada (Imagen). Elaboración propia

Figura 128 – Mobiliario baño (Imagen). Elaboración propia

Figura 129 – Mobiliario habitación individual/despacho (Imagen). Elaboración propia

Figura 130 – Mobiliario habitación doble (Imagen). Elaboración propia

Figura 131 – Mobiliario salón (Imagen). Elaboración propia

Figura 132 – Vistas generales (Imagen). Elaboración propia

Figura 133 – Fachada longitudinal (Imagen). Elaboración propia

Figura 134 – Fachada transversal (Imagen). Elaboración propia

Figura 135 – Cubierta (Imagen). Elaboración propia

Figura 136 – Vista 3D de la estructura en CYPE3D (Imagen). Elaboración propia

Figura 137 – Tabla de tipos de barras (Tabla). Elaboración propia

Figura 138 – Tabla de Nudos en cubierta (Tabla). Elaboración propia

Figura 139 – Área de acción de Nudos A (Imagen). Elaboración propia

Figura 140 – Área de acción de Nudos B (Imagen). Elaboración propia

Figura 141 – Área de acción de Nudos C (Imagen). Elaboración propia

Figura 142 – Tabla de Nudos en alzado longitudinal (Tabla). Elaboración propia

Figura 143 – Área de acción de Nudos D (Imagen). Elaboración propia

Figura 144 – Área de acción de Nudos E (Imagen). Elaboración propia

Figura 145 – Tabla de Nudos en alzado transversal (Tabla). Elaboración propia

Figura 146 – Área de acción de Nudos F (Imagen). Elaboración propia

Figura 147 – Área de acción de Nudos G (Imagen). Elaboración propia

Figura 148 – Área de acción de Nudos H (Imagen). Elaboración propia

Figura 149 – Tabla de secciones finales de la estructura por barras (Tabla). Elaboración propia

Figura 150 – Boceto del nudo de Ricolais (Imagen). Recuperado de: Le Ricolais, R. (1997) Robert Le Ricolais: Visiones y Paradojas [Exposición]. Madrid. Fundación Cultural COAM. ISBN: 84-88496-20-6.

Figura 151 – Pérgola en el Albir de SIDO Maderas (Imagen). Recuperado de: <http://www.sidomadera.com/>

Figura 152 – Tabla de las secciones finales de las barras (Tabla). Elaboración propia

Figura 153 – Planta del nudo propuesto (Imagen). Elaboración propia

Figura 154 – Alzado del nudo propuesto (Imagen). Elaboración propia

Figura 155 – Planta del nudo con las barras (Imagen). Elaboración propia

Figura 156 – Vista axonométrica del nudo con las barras (Imagen). Elaboración propia

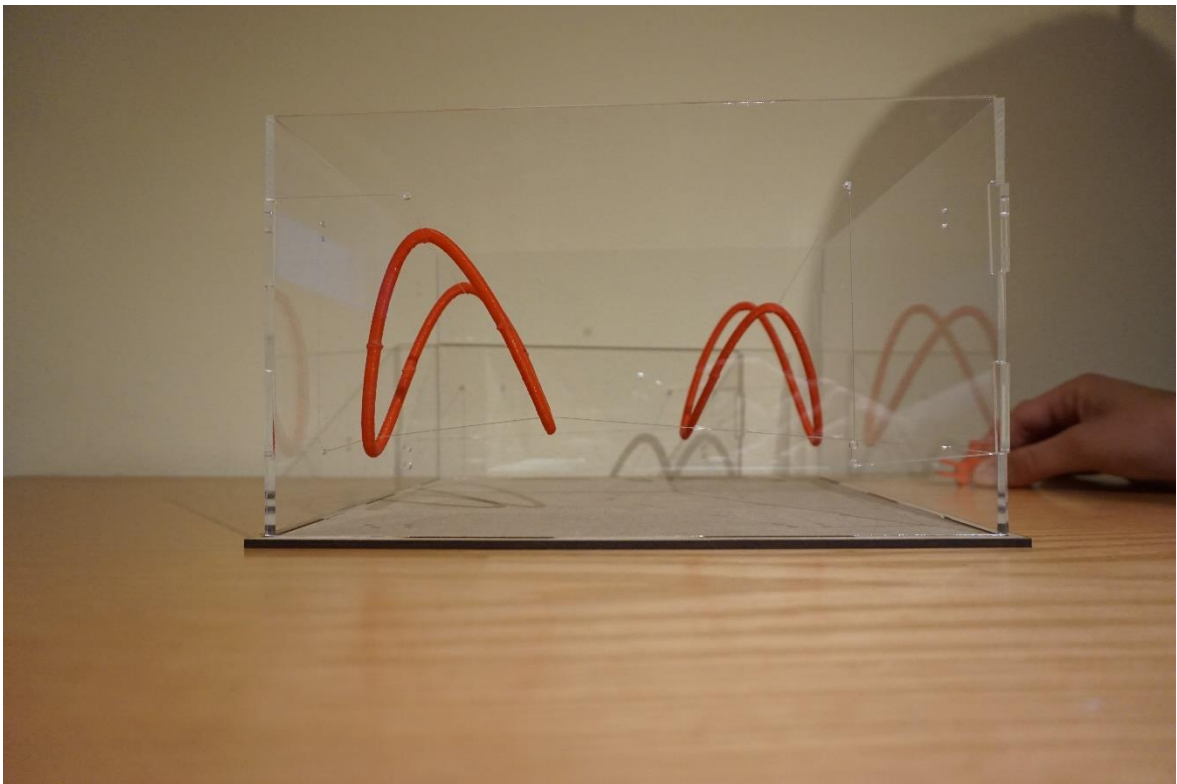
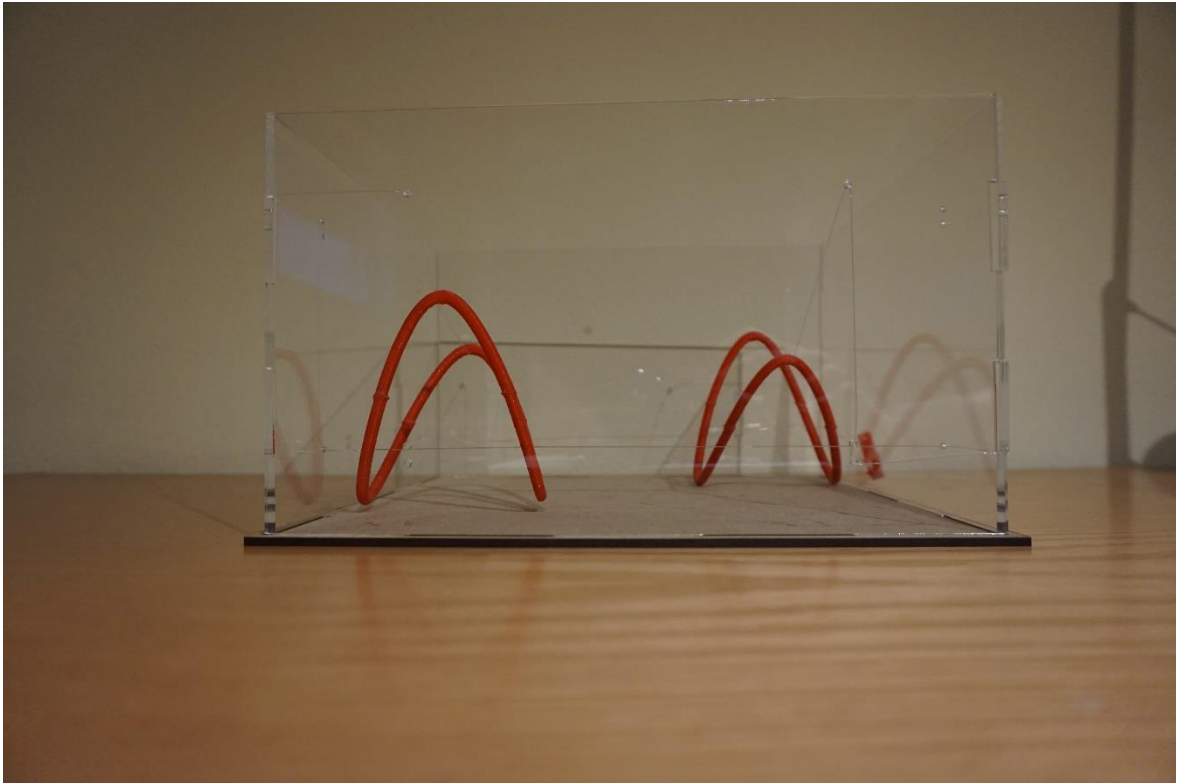
Figura 157 – Ejemplo 1 Grasshopper (Imagen). Elaboración propia

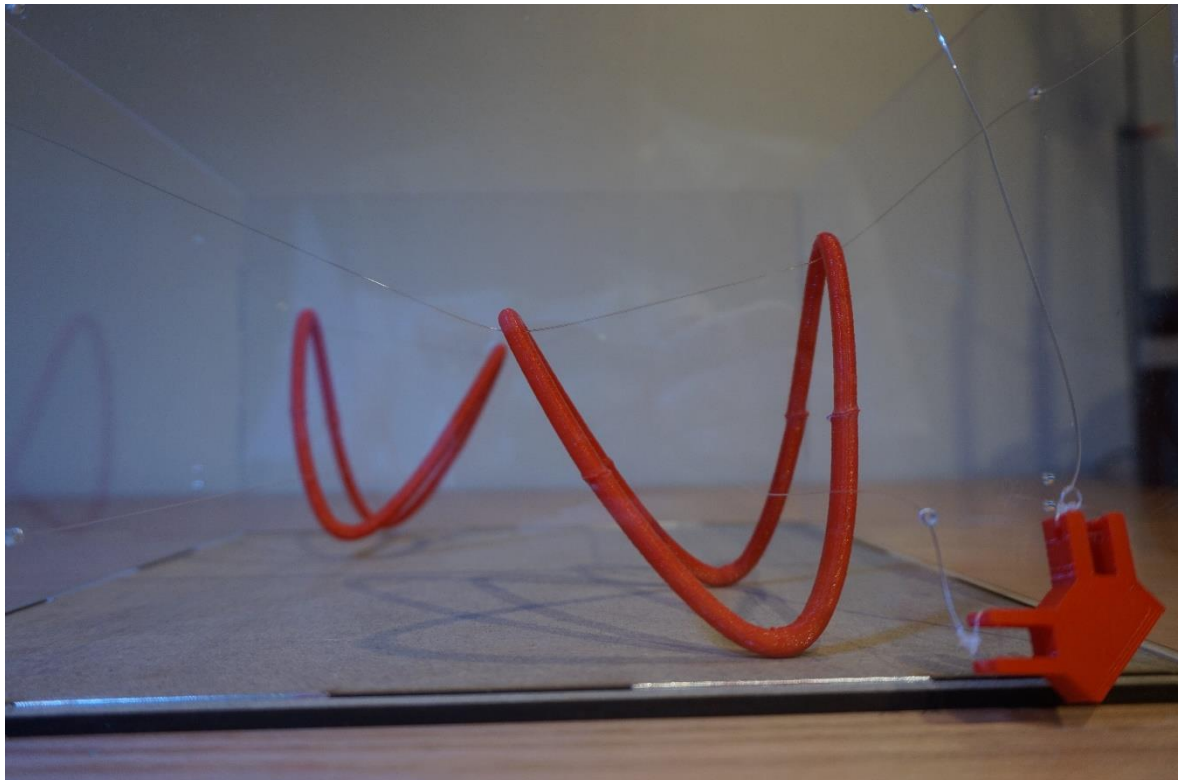
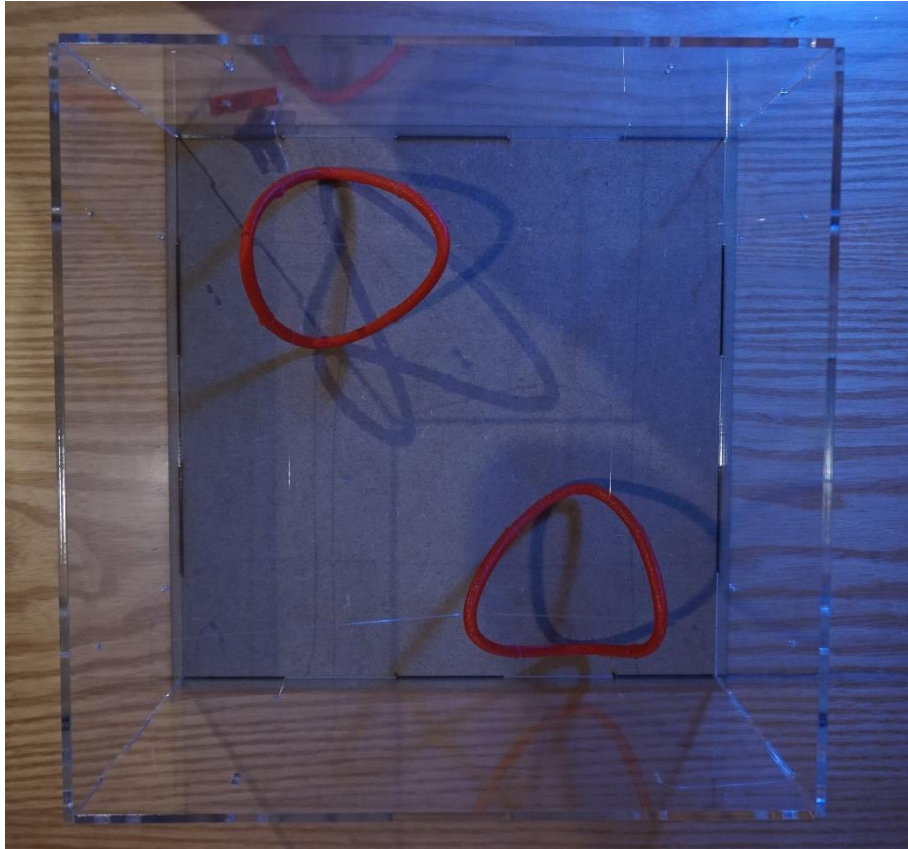
Figura 158 – Ejemplo 2 Grasshopper (Imagen). Elaboración propia

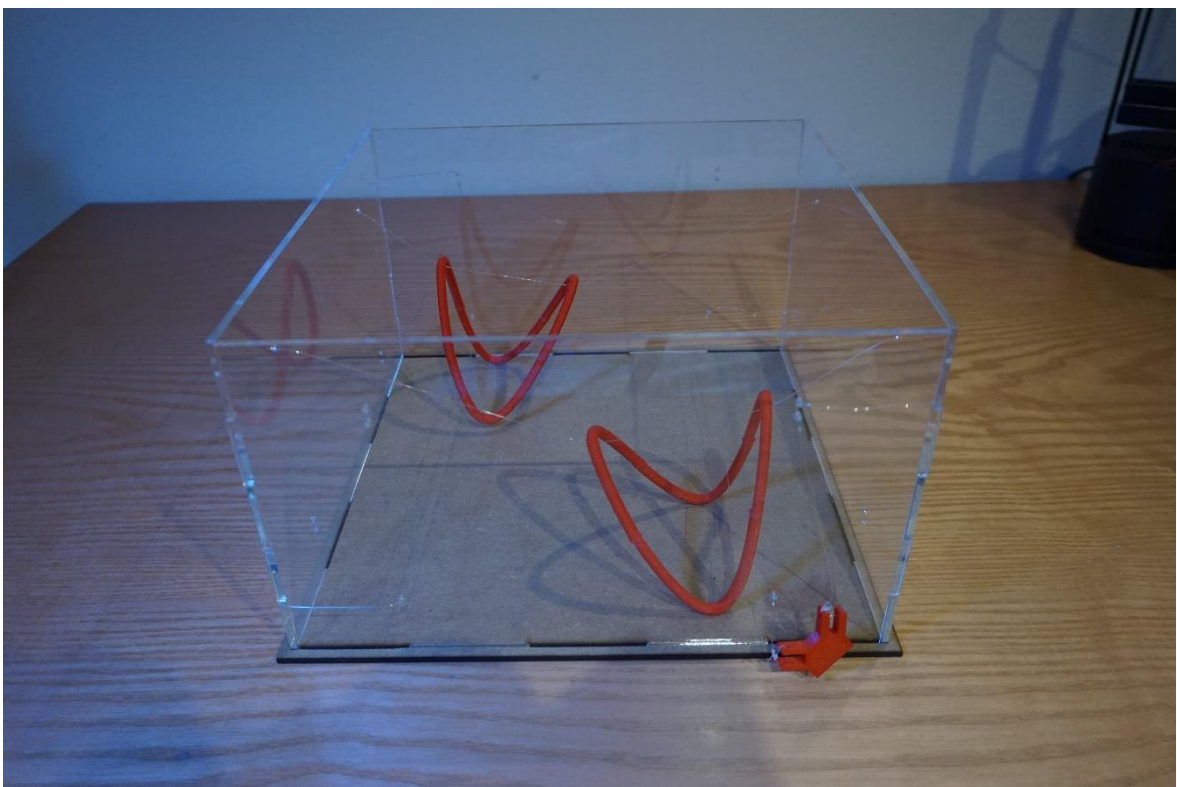
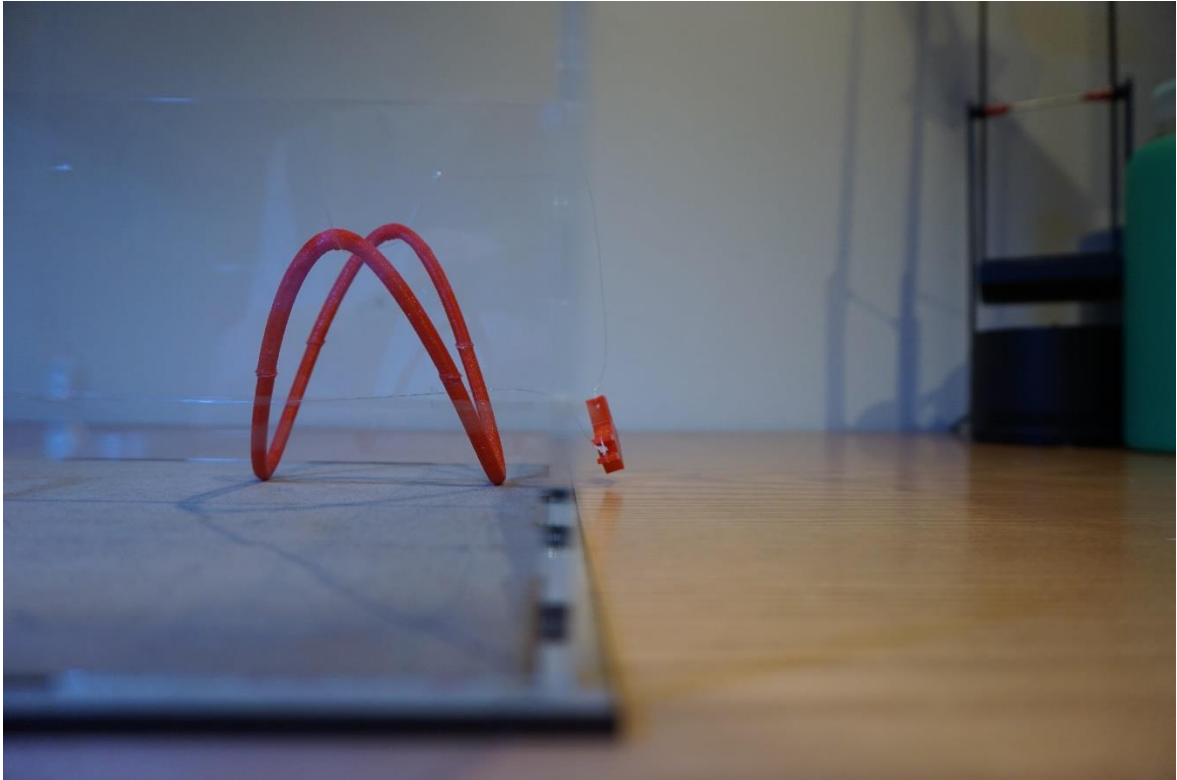
Figura 159 – Ejemplo 3 Grasshopper (Imagen). Elaboración propia

09_ ANEXOS

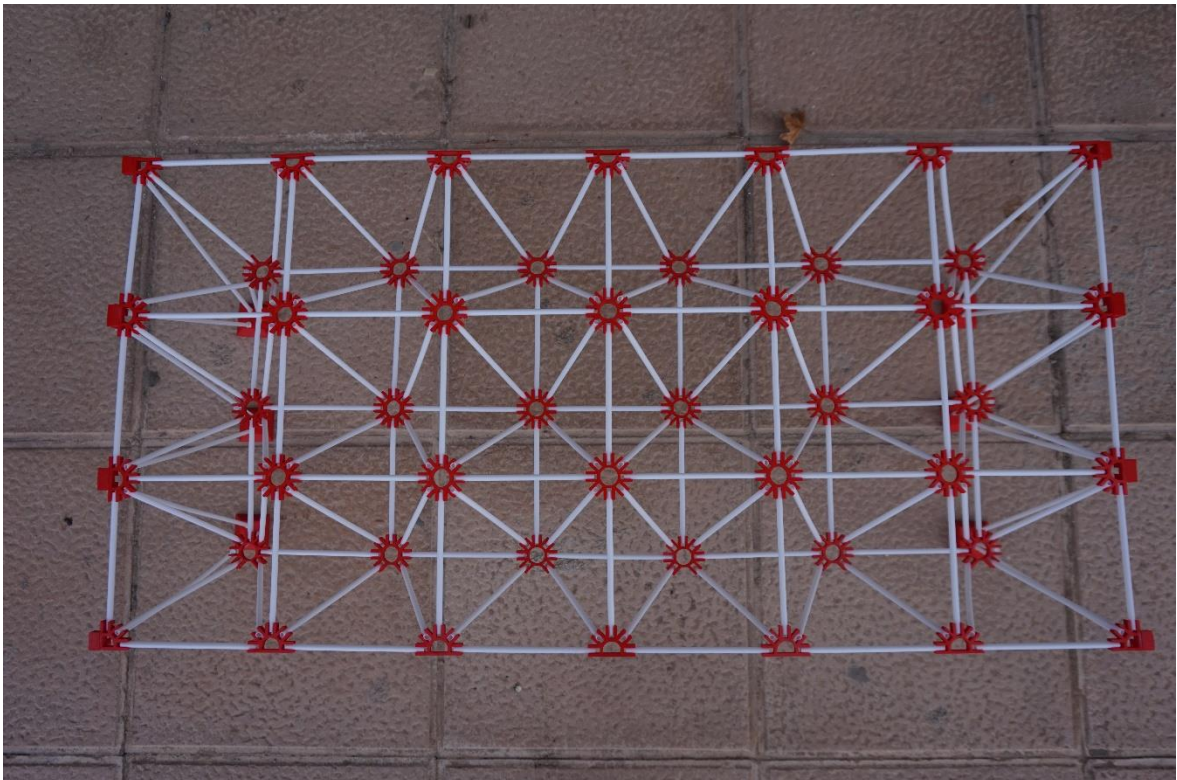
09.1_ Fotos Maqueta 1



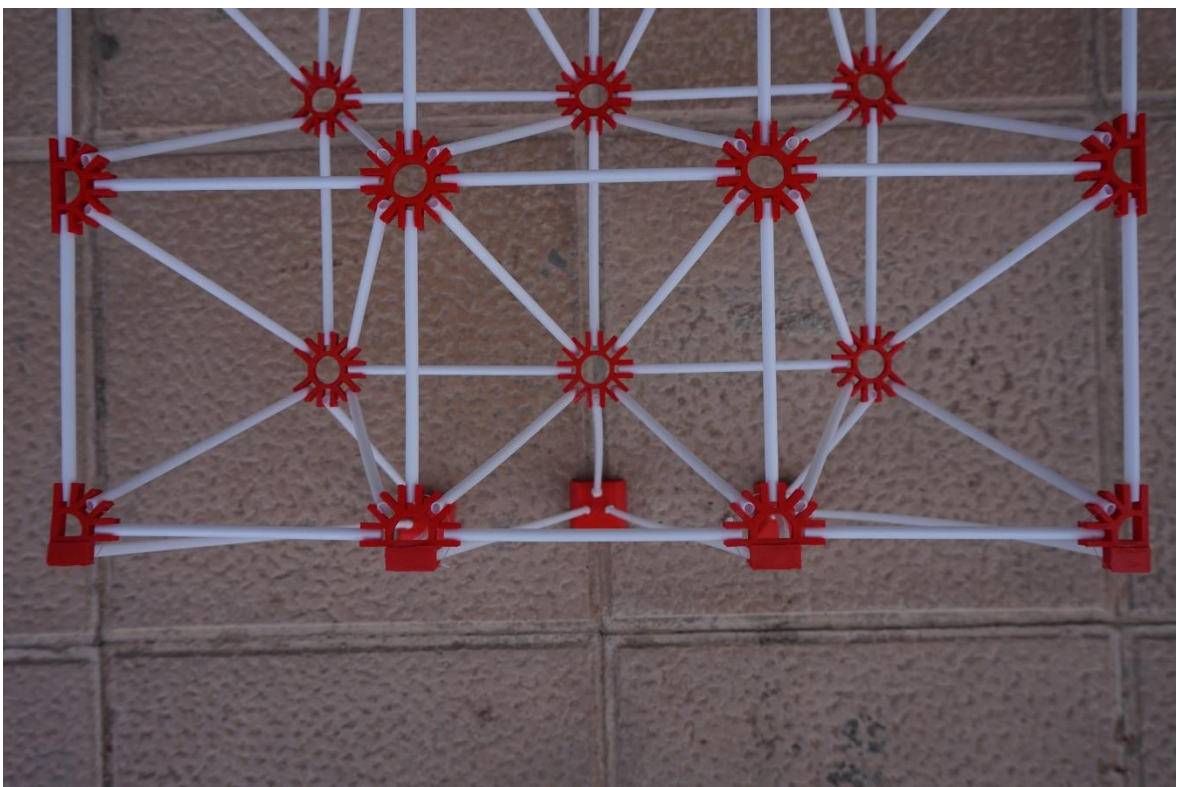
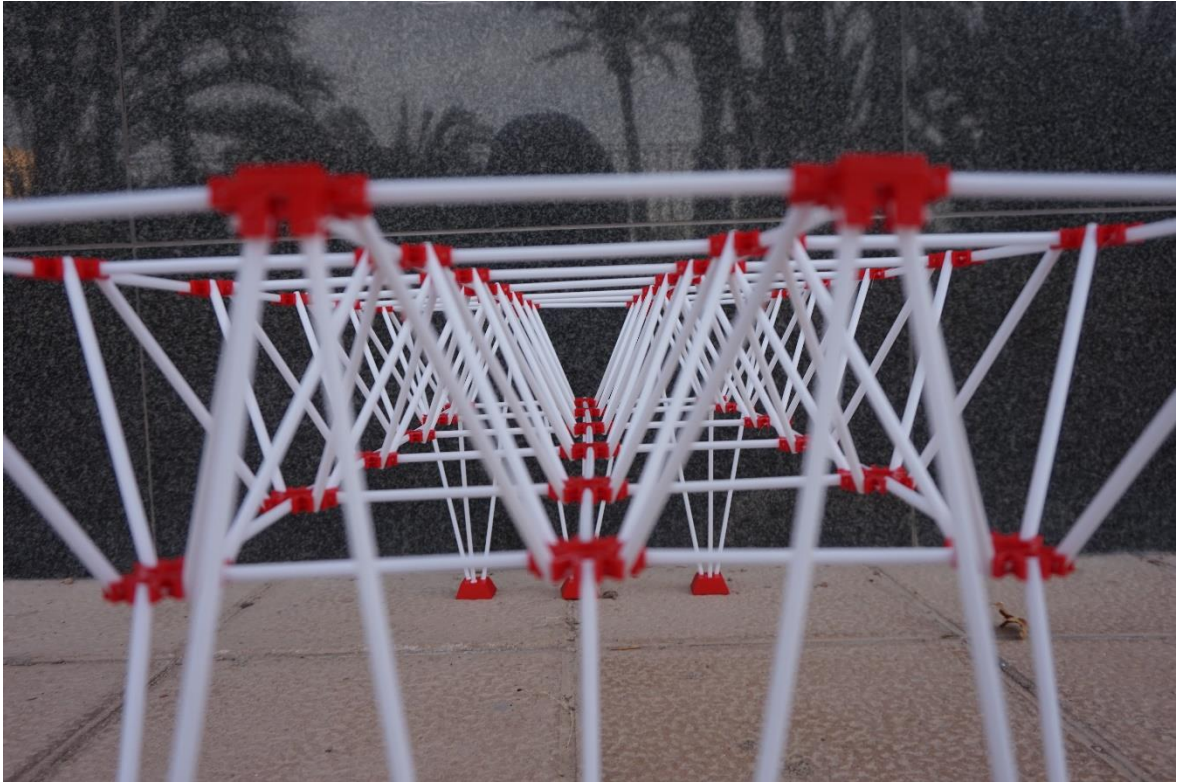




09.2_ Fotos Maqueta 2







09.3_ Fotos Maqueta 3

